

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»

На правах рукописи



Числавлев Владимир Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ НА ОСНОВЕ
РАЦИОНАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ МЕТАЛЛА В
ПРОМЕЖУТОЧНОМ КОВШЕ**

Специальность 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор,
Заслуженный работник высшей школы РФ
Е.В. Протопопов

Новокузнецк – 2019

Содержание

Введение.....	4
1 Современное состояние непрерывной разливки рельсовых марок стали	12
1.1 Современные тенденции развития производства рельсовой металлопродукции	12
1.2 Характеристики качества непрерывнолитых заготовок рельсовых марок стали	18
1.3 Способы рафинирования металлического расплава в промежуточном ковше машины непрерывного литья заготовок	31
Выводы и постановка задач исследования	42
2 Установка и методики исследования процессов рафинирования стали при непрерывной разливке	43
2.1 Физическое моделирование процессов гидродинамики в промежуточном ковше машины непрерывного литья заготовок	43
2.1.1 Анализ условий подобия исследуемых процессов	43
2.1.2 Разработка лабораторного комплекса для исследования гидродинамических процессов в промежуточном ковше МНЛЗ	52
2.2 Программная реализация математической модели течения металлического расплава в промежуточном ковше	59
2.3 Методика оценки эффективности применения гидродинамических элементов в промежуточном ковше	67
Выводы.....	73
3 Моделирование процессов гидродинамики в промежуточном ковше при непрерывной разливке стали	74
3.1 Исследование гидродинамических процессов в промежуточном ковше базового варианта конструкции	74
3.2 Исследование гидродинамических процессов в промежуточном ковше оборудованном порогами	83

3.3 Исследование гидродинамических процессов в промежуточном ковше оборудованном струегасителем	94
3.4 Исследование гидродинамических процессов в многокамерном промежуточном ковше	106
Выводы	118
4 Промышленная реализация модернизированной конфигурации внутреннего объема промежуточного ковша для условий непрерывной разливки стали на АО «ЕВРАЗ ЗСМК»	120
4.1 Условия проведения промышленного исследования.....	120
4.2 Анализ распределения примесей в непрерывнолитой заготовке	124
4.3 Анализ качества рельсовой металлопродукции	133
Выводы	142
Заключение	144
Список литературы	146
Приложения	167

Введение

Актуальность темы исследования.

Согласно стратегии развития черной металлургии России на 2014-2020 годы и на перспективу до 2030 года создание высокоскоростных железнодорожных магистралей в Российской Федерации является проектом национального масштаба, который предопределяет развитие государства.

В настоящее время тенденции развития высокоскоростных железнодорожных магистралей и конкуренция мировых производителей рельсовой металлопродукции приводят к появлению новых стандартов и все большему ужесточению требований, предъявляемых к качеству рельсового металла. Металлургическое качество стали определяется химической однородностью и содержанием неметаллических включений, которые ухудшают эксплуатационные свойства металлопродукции и приводят к трещинообразованию и разрушению.

Гомогенизация металлического расплава и его рафинирование от неметаллических включений осуществляется во время внепечной обработки и при непрерывной разливке стали. Обеспечение условий рафинирования стального расплава в процессе непрерывной разливки позволяет значительно повысить эффективность мероприятий внепечной обработки стали.

В связи с тем, что промежуточный ковш машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) является заключительной футерованной ёмкостью, где сталь находится в жидком состоянии, целесообразно обеспечивать в нем рафинирование металла от докристаллизационных неметаллических включений. Условия рафинирования металла в промежуточном ковше во многом определяются его внутренней геометрией и гидродинамическими процессами, которые обуславливают распределение и динамику движения металлического расплава и неметаллических включений. Зачастую вопросам распределения потоков металла при непрерывной разливке уделяется незначительное внимание,

что приводит к неполному использованию потенциала промежуточного ковша как агрегата для обеспечения гомогенизации металла и повышения его чистоты по неметаллическим включениям. Гидродинамические процессы в промежуточном ковше определяются как геометрическими параметрами внутреннего объема ковша, так и технологическими особенностями непрерывной разливки стали. При сложившемся многообразии существующих конструктивных вариантов современных машин непрерывного литья заготовок и технологических аспектов непрерывной разливки стали, необходимо учитывать невозможность использования типовых технических решений при модернизации конкретного агрегата.

В связи с этим обеспечение гомогенизации металла и его рафинирования от неметаллических включений при организации соответствующих гидродинамических условий в промежуточном ковше на основе рационального распределения потоков металла является актуальной научно-практической задачей.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом хоздоговорных и госбюджетных НИР ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» в рамках: базовой части Государственного задания Минобрнауки РФ № АААА-Б18-218012390005-5 «Развитие теоретических основ процессов формирования качества рельсовой продукции для высокоскоростных железных дорог», 2017-2018 гг.; гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук № АААА-А17-117030910047-9 «Разработка и применение аддитивных технологий при модернизации процессов производства металлопродукции ответственного назначения», 2017-2018 гг.; научно-исследовательской работы № АААА-Б17-217012040051-1 «Исследование потоков жидкого металла в промежуточном ковше», 2016 г.

Степень разработанности темы исследования.

Вопросам создания благоприятных гидродинамических условий в промежуточном ковше при непрерывной разливке стали уделяется большое

внимание отечественных и зарубежных ученых и исследователей. Перспективным направлением является разработка специальных огнеупорных элементов для распределения потоков металла, однако разнообразие вариантов конфигурации внутреннего объема промежуточного ковша и отсутствие возможности использования универсальных решений при модернизации существующих промежуточных ковшей не позволяет добиться конкурентных показателей качества без проведения исследований для конкретных условий. Возможным решением проблемы является разработка конструкции огнеупорных элементов для заданных условий непрерывной разливки стали с научным обоснованием эффективности их использования с применением современных компьютерных и аддитивных технологий, включающих проектирование и создание виртуальной модели устройства современными средствами автоматизированного проектирования, математического моделирования методом конечных элементов и физического моделирования исследуемых процессов.

Цель и задачи работы.

Повышение эффективности гомогенизации и рафинирования рельсовой стали от неметаллических включений на основе рациональной организации гидродинамических процессов в промежуточных ковшах машин непрерывного литья заготовок.

Основные задачи:

1) Адаптировать для условий применения к промежуточным ковшам МНЛЗ метод исследования распределения времени пребывания жидкости в агрегате (проточном реакторе непрерывного действия) для оценки эффективности гомогенизации расплава.

2) Разработать и сконструировать лабораторно-экспериментальный комплекс для проведения исследований гидродинамических процессов в промежуточном ковше МНЛЗ.

3) Исследовать с использованием трехмерной математической модели гидродинамику стального расплава в промежуточных ковшах МНЛЗ с различной конфигурацией внутреннего объема.

4) Выполнить комплексное исследование влияния дополнительных огнеупорных элементов (пороги, струегасители, перегородки) различных конфигураций на процессы движения расплава.

5) Установить на основе теоретических и экспериментальных исследований зависимости и закономерности движения расплава при рафинировании металла в промежуточном ковше.

6) Разработать рациональные конструкцию и конфигурацию внутреннего объема промежуточного ковша четырехручьевого МНЛЗ, обеспечивающие эффективную гомогенизацию расплава рельсовой стали и его рафинирование от неметаллических включений.

7) Провести промышленную апробацию результатов исследований в технологической практике непрерывной разливки рельсовой стали в условиях АО «ЕВРАЗ Западно-Сибирский металлургический комбинат» и внедрить их в учебный процесс при подготовке обучающихся по направлению 22.03.02 – Металлургия.

Научная новизна.

1) Развита научная основа повышения эффективности обработки стального расплава при непрерывной разливке посредством рациональной организации гидродинамических процессов в промежуточных ковшах МНЛЗ.

2) Установлены и научно обоснованы новые зависимости и закономерности влияния гидродинамических процессов в промежуточном ковше МНЛЗ на гомогенизацию расплава и эффективность рафинирования стали от неметаллических включений.

3) Получены новые количественные данные о влиянии огнеупорных элементов различных конфигураций на характеристики и структуру потоков при движении металлического расплава в промежуточном ковше МНЛЗ.

4) Разработана номограмма для определения структуры потоков расплава стали в промежуточном ковше при производстве металлопродукции с регламентированным уровнем загрязненности неметаллическими включениями.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1) Адаптирован для условий применения к промежуточным ковшам МНЛЗ метод оценки эффективности гомогенизации стального расплава, основанный на определении объемов жидкого металла находящихся в зонах: застойной (отсутствует циркуляция расплава), идеального вытеснения (режим течения расплава приближен к ламинарному) и идеального смешения (область с равномерным перемешиванием расплава).

2) Для проведения комплексных, многофакторных исследований гидродинамических процессов в промежуточных ковшах МНЛЗ создан лабораторно-экспериментальный комплекс (Патент РФ №164038), включающий в себя физическую модель ковша в масштабе 1:2,5, оснащенный устройствами для кондуктометрического анализа, средствами видеофиксации, контрольно-измерительной цифровой аппаратурой.

3) Получены соотношения, зависимости и закономерности для осуществления инженерных расчетов при проектировании конструкции промежуточных ковшей, обеспечивающей эффективные гомогенизацию и рафинирование стали от неметаллических включений.

4) Разработана конструкция полнопрофильных перегородок, обеспечивающих рациональную организацию потоков расплава, его гомогенизацию и эффективное рафинирование рельсовой стали от неметаллических включений в промежуточном ковше.

5) Результаты исследований прошли апробацию в условиях АО «Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» и использованы при совершенствовании технологии непрерывной разливки рельсовой стали и конструкции промежуточных ковшей четырехручьевого МНЛЗ.

6) Полученные в работе научные результаты внедрены в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» в учебный процесс при подготовке обучающихся по направлению 22.03.02 – Металлургия.

Методология и методы исследования.

Для решения поставленных задач использованы методы: математического и физического моделирования; визуализации гидродинамических процессов с использованием красителя (перманганат калия); кондуктометрический, с использованием кондуктометра PS202; исследования распределения времени пребывания жидкости в агрегате. Загрязненность металла неметаллическими включениями оценивали с помощью металлографического метода (ГОСТ 1778-70). Исследования химического состава неметаллических включений выполнены с использованием сканирующего электронного микроскопа MIRA 3 LMN, оснащенного аналитической системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа Oxford Instruments Advanced Aztec Energy Inca350/X-max 20 (ГОСТ Р 8.563-96 и МИ 2336-95, ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002). Численные эксперименты проведены на трехмерной математической модели течения металлического расплава в промежуточном ковше с использованием метода конечных объемов.

Положения, выносимые на защиту.

1) Результаты адаптации метода исследования распределения времени пребывания жидкости в агрегате (проточном реакторе непрерывного действия) для оценки эффективности рафинирования расплава стали от неметаллических включений для условий применения к промежуточным ковшам МНЛЗ.

2) Результаты экспериментальных исследований гидродинамических процессов в промежуточном ковше с различной конфигурацией внутреннего объема, проведенных на разработанном лабораторно-экспериментальном комплексе.

3) Результаты программной реализации модели гидродинамических процессов и математического моделирования движения металлического расплава в промежуточных ковшах МНЛЗ различных конструкций.

4) Конструкция полнопрофильных перегородок, обеспечивающих рациональную организацию потоков расплава, его гомогенизацию и эффективное рафинирование рельсовой стали от неметаллических включений в

промежуточном ковше.

5) Результаты промышленной апробации в условиях АО «Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» разработанной конструкции полнопрофильных перегородок в промежуточных ковшах четырехручьевого МНЛЗ при непрерывной разливке рельсовой стали.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности ВАК 05.16.02 – Металлургия черных, цветных и редких металлов по п. 7 «Тепло- и массоперенос в низко- и высокотемпературных процессах»; п. 16 «Разливка продуктов плавки и методы непрерывной разливки».

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов, методов, методик, выводов и рекомендаций подтверждается использованием современных методов теоретического и экспериментального исследования процессов гидродинамики, качеством измерений их характеристик и статистической обработкой результатов; адекватностью реализованных физических и математических моделей; применением широко распространенных разнообразных и апробированных методов анализа; сопоставлением полученных результатов с данными других исследователей; результатами промышленной апробации.

Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения» (г. Новокузнецк, 2014, 2015, 2016, 2017 гг.); XVIII Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество» (г. Новокузнецк, 2014 г.); Инновационном конвенте «Кузбасс: образование, наука, инновации» (г. Кемерово, 2014, 2015, 2016 гг.); XI Международной научно-практической конференции «Литье. Металлургия. 2015» (Украина, г. Запорожье, 2015 г.); Международной интерактивной научно-практической конференции (г. Екатеринбург, 2015 г.); XIII Международной научно-технической конференции

молодых специалистов (г. Новокузнецк, 2015 г.); VIII конференция молодых специалистов «Перспективы развития металлургических технологий» (г. Москва, 2017 г.); XX Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество» (г. Новокузнецк, 2017 г.); XV Международной конференции огнеупорщиков и металлургов (г. Москва, 2017 г.); XV Международном Конгрессе сталеплавильщиков и производителей металла (г. Тула, 2018 г.).

Публикации.

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 22 печатных работах, в том числе 3 статья в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ, а также в 2 статьях, входящих в базы данных Web of Science и Scopus. По результатам работы получено 2 патента РФ на полезную модель.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы и приложений. Изложена на 170 страницах, содержит 27 таблиц, 105 рисунков. Список литературы включает 189 наименований.

1 Современное состояние непрерывной разливки рельсовых марок стали

1.1 Современные тенденции развития производства рельсовой металлопродукции

В настоящее время, согласно стратегии развития черной металлургии России на 2014 - 2020 годы и на перспективу до 2030 года [1] одним из основных направлений совершенствования отечественной металлургии является производство рельсов для высокоскоростных магистралей железнодорожного транспорта с увеличенным в 3-5 раз сроком эксплуатации, в связи с этим особую актуальность приобретает обеспечение производителями высокого качества рельсовой металлопродукции.

Высокое металлургическое качество рельсов связано прежде всего с отсутствием в них скоплений и отдельных крупных хрупкоразрушенных оксидных неметаллических включений, что обеспечивается низким содержанием в стали алюминия (менее 0,004%) и кислорода (общего – менее 20 ppm и связанного в высокоглиноземистые оксидные включения – менее 10 ppm) [2]. Содержание неметаллических включений и их химический состав определяется технологией производства стали [3].

Выплавка рельсовых марок стали осуществляется как в конвертерах, так и в дуговых сталеплавильных печах. В таблице 1.1 представлены способы выплавки рельсового металла ведущими производителями металлопродукции [4].

Сопоставление требований к химическому составу рельсовой стали отечественных и зарубежных стандартов (стандарт Американского общества по испытанию материалов ASTM и Американской ассоциации инженеров-железнодорожников AREA, стандарт Международного союза железных дорог UIC 860, национальные стандарты Японии JIS E 1101 и JIS E 1124, Канады CNR 12-16, Великобритании BS 11) приведены в таблице 1.2 [5].

Таблица 1.1 – Технологические варианты производства рельсов

Страна-изготовитель рельсов, предприятие	Выплавка стали	Термическая обработка
Россия, АО «ЕВРАЗ ЗСМК»	Электродная	Дифференцированная закалка
Россия, АО «ЕВРАЗ НТМК»	Кислородный конвертер	Объемная закалка с отдельного печного нагрева
Россия, ПАО «ЧМК»		Дифференцированная закалка
Франция		Двухсторонняя закалка сжатым воздухом с отдельного объемного нагрева ТВЧ
Япония		Двухсторонняя закалка сжатым воздухом с прокатного нагрева
США		Двухсторонняя закалка водой с прокатного нагрева
Австрия		Односторонняя закалка в растворе полимера с прокатного нагрева
Италия		Без термического упрочнения
Польша		Без термического упрочнения

Таблица 1.2 – Сопоставление требований к химическому составу рельсовой стали

Страна и стандарт	Масса 1 погонного метра, кг	Марка стали	Содержание элементов, %						
			C	Mn	Si	Cr	V	S	P
								не более	
Россия ГОСТ Р 51685-2013	65	K76Ф				-		0,035	0,030
		Э76Ф	0,71-0,82	0,75-1,25	0,25-0,60	-	0,3-0,15	0,030	0,025
		Э76ХФ				0,25-0,6		0,025	0,025
ASTM A1-84 США AREA	57 и выше 44,6-56,6		0,72-0,82	0,80-1,10	0,10-0,50	-	-	0,040	0,035
			0,67-0,80	0,70-1,00	0,10-0,50			0,037	0,035
МСЖД UIC860	типы UIC54, UIC60, UIC71	700	0,40-0,60	0,80-1,25	0,05-0,35	-	-	0,05	0,05
		900A	0,60-0,80	0,80-1,30	0,10-0,50	-	-	0,04	0,04
		900B	0,55-0,75	1,30-1,70	0,10-0,50	-	-	0,04	0,04
		1100	0,60-0,82	0,80-1,30	0,30-0,90	0,80-1,30		0,03	0,03
Япония JIS 1101 JIS E 1124	менее 60 60 и более	-	0,45-0,55	0,95-1,25	0,08-0,20	-	-	0,060	0,060
			0,60-0,75	0,70-1,10	0,10-0,30			0,035	0,035
Канада CNR 12-16	-	обычные рельсы	0,72-0,82	0,80-1,10	0,10-0,50	0,25-0,40	-	0,020	0,030
		с упрочненной головкой полностью термически обработанные	0,70-0,82	0,70-1,10	0,40-1,0	0,40-0,70	-	0,020	0,030
			0,72-0,82	0,80-1,10	0,10-0,50	-	-	0,020	0,030

Страна и стандарт	Масса 1 погонного метра, кг	Марка стали	Содержание элементов, %						
			C	Mn	Si	Cr	V	S	P
			не более						
Англия BS 11	-	Нормальн.	0,45-0,60	0,95-1,12	0,06-0,35	-	-	0,040	0,040
		Износостойкость А	0,65-0,80	0,80-1,30	0,10-0,50			0,040	0,040
		Износостойкость В	0,55-0,75	1,30-1,70	0,10-0,50			0,040	0,040

Анализ физико-механических свойств рельсов различных производителей позволяет оценить влияние вида нагрева, определяющего размер зерна и химический состав стали на уровень ударной вязкости, копровой прочности и трещиностойкости. Механические свойства железнодорожных рельсов отечественного и зарубежного производства представлены в таблице 1.3 [5, 6].

Таблица 1.3 – Механические свойства железнодорожных рельсов отечественного и зарубежного производства

Страна-изготовитель рельсов, предприятие	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное		Ударная вязкость (20°C) МДж/м ²
			Удлинение, %	Сужение, %	
Россия, АО «ЕВРАЗ ЗСМК», ДТ350	1304	930	11,5	30,6	0,25-0,29
Россия, ПАО «ЧМК», ДТ350	1350	943	11,8	30,6	0,25-0,29
Франция	1306	1135	12,3	35,0	0,25 – 0,33
Япония, NS	1319	915	12,4	41,0	0,24 – 0,26
Канада	1359	929	13,4	37,0	0,26 – 0,36
Австрия	1364	952	10,0	33,0	0,14 – 0,21
Италия	1281	972,5	8,8	32,1	0,13 – 0,19
Польша	1215	748	9,7	24,9	0,11 – 0,16
США	1276	888	10,8	26,4	0,23 – 0,31

Термически упрочненные рельсы за счет большего размера зерна и дополнительного легирования хромом, обладают ударной вязкостью в 1,4 – 2,0 раза меньше по сравнению с рельсами, упрочненными объемной закалкой в масле, при которой происходит измельчение зерна вследствие рекристаллизации.

В таблице 1.4 приведены результаты испытаний по определению предела выносливости и циклической трещиностойкости рельсов отечественного и зарубежного производства [2, 5, 6].

Таблица 1.4 – Результаты испытаний по определению предела выносливости и циклической трещиностойкости рельсов отечественного и зарубежного производства

Страна изготовитель рельсов, предприятие	Предел выносливости, МПа	Трещиностойкость (Kfc), МПа·м ^{1/2}
Россия, АО «ЕВРАЗ ЗСМК», ДТ350	447	36-45
Россия, ПАО «ЧМК», ДТ350	531	37-51
Франция	477	-
Япония	430	26 – 38
Канада	453	-
Австрия	423	25 – 36
Италия	366	25 – 29
Польша	367	29 – 31
США	370	32-52

За последнее время значительно возрос интерес к рельсам низкотемпературной надежности, что особенно актуально при транспортировке грузов в экстремальных условиях Крайнего Севера России [1]. Испытания, проведенные в работе [5], показывают (таблица 1.5), что термически упрочненные с прокатного нагрева рельсы обладают более низким уровнем копровой прочности при температуре – 60 °С по сравнению с объемнозакаленными .

Таблица 1.5 – Результаты копровых испытаний рельсов отечественного и зарубежного производства при температуре – 60 °С

Страна-изготовитель рельсов, предприятие	Работа разрушения, при t = -60°С
Россия, АО «ЕВРАЗ ЗСМК»	>10
Франция	>10
Япония	5,5
Канада	>10
Австрия	5,5

Особая роль при производстве рельсового металла отводится технологии раскисления, которая в значительной степени определяет чистоту металла по оксидным неметаллическим включениям.

В работе [7, 8] проведены исследования различных технологических вариантов раскисления при выпуске из конвертера и внепечной обработке для условий ККЦ -1 АО «ЕВРАЗ НТМК» (таблица 1.6).

Таблица 1.6 – Основные технологические параметры внепечной обработки рельсовой стали для различных вариантов раскисления

Вариант технологии	Вводимые ферросплавы и шлакообразующие		
	Выпуск из кислородного конвертера	Установка «ковш –печь»	Вакууматор *
А	FeMn, FeSi65	CaO, CaF ₂ , FeSi65, FeV	SiCa, Ar - 5 мин
Б	FeMn, FeSi65	CaO, CaF ₂ , FeSi65, FeV	Ar - 5 мин
В	FeMn, FeSi65	CaO, CaF ₂ , FeSi65, FeV, SiCa	Ar - 5 мин
Г	FeMn, FeSi65	CaO, CaF ₂ , FeSi65, FeV, FeCa	Ar - 5 мин
Д	FeMn, FeSi65	CaO, CaF ₂ , FeSi65, FeV	FeCa, Ar - 5 мин
Е	FeMn, FeSi65, CaC ₂	CaO, CaF ₂ , FeSi65, FeV	Ar - 5 мин
Ж	FeMn, FeSi65, CaC ₂	CaO, CaF ₂ , FeSi65, FeV	SiCa, Ar - 5 мин
И	FeMn, FeSi65	CaO, CaF ₂ , FeV	Ar - 5 мин
* время рафинирующей продувки аргоном после обработки на вакууматоре			

Общее содержание кислорода и содержание кислорода в виде силикатов, алюминатов и алюмосиликатов кальция (алюмомагниевого шпинели) в образцах рельсовой стали, раскисленной по различным вариантам, представлено на рисунке 1.1 [7].

Анализ [7] показывает, что лучшие результаты по чистоте стали по недеформируемым включениям - алюминатам и сложным алюмосиликатам кальция показали образцы металла, выплавленного по вариантам технологии без

применения силикокальцевой проволоки (технология Б) и с ограничением содержания алюминия в металле менее 0,0040 % (масс.) (технология И).

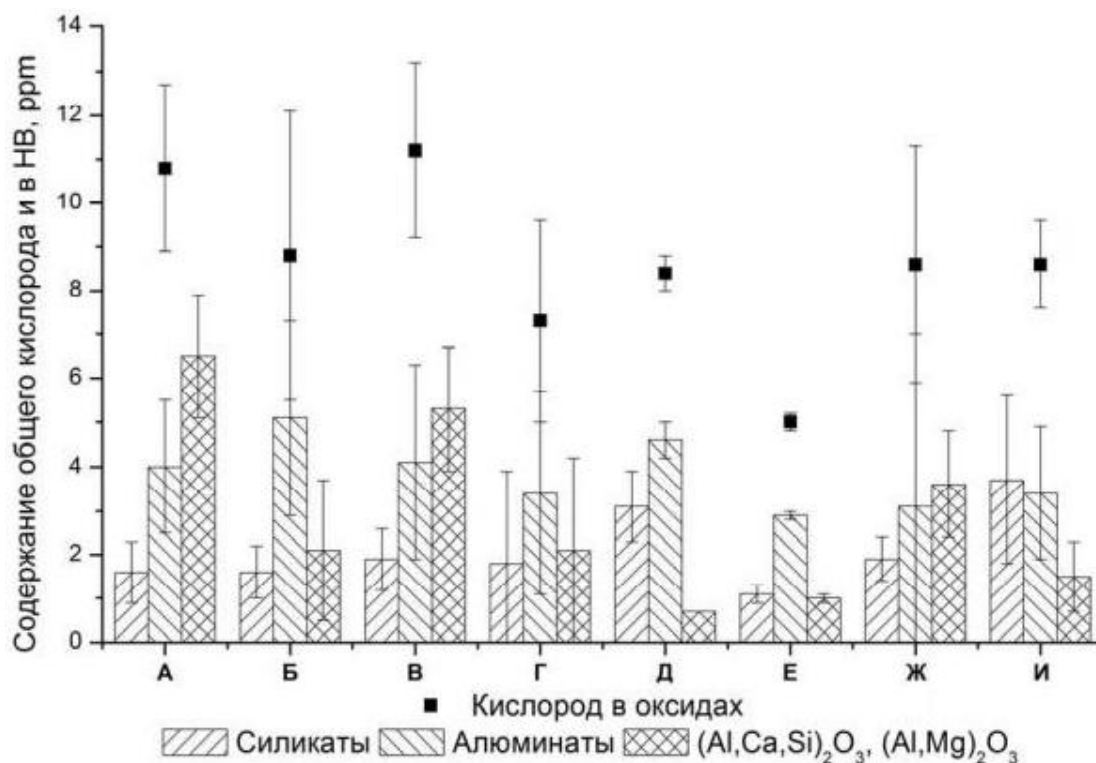


Рисунок 1.1 – Общее содержание кислорода и содержание кислорода в виде силикатов, алюминатов и алюмосиликатов кальция (алюмомагниевого шпинели) в образцах рельсовой стали

Кроме технологии раскисления и химического состава раскислителей важным является химический состав шлака внепечной обработки, при повышении в нем концентрации Al_2O_3 более 20 % в расплаве значительно увеличивается доля высокоглиноземистых включений, независимо от концентрации алюминия во вводимых ферросплавах [7, 9].

Производству рельсов для высокоскоростных железнодорожных магистралей во всем мире уделяется особое внимание, что приводит к постоянному ужесточению требований к качеству рельсов и сроку их эксплуатации. Качество рельсового металла формируется на технологических стадиях его производства, при этом особое внимание уделяется конечной стадии – непрерывной разливке, где еще имеется возможность оказывать воздействие на жидкий металл до формирования непрерывнолитой заготовки.

1.2 Характеристики качества непрерывнолитых заготовок рельсовых марок стали

Под качеством металлопродукции [10] понимается совокупность свойств металлургической продукции, обуславливающей ее способность удовлетворять определенные требования в соответствии с назначением. В настоящее время успех реализации металлургической продукции определяется не только её соответствием государственным и международным стандартам, но и дополнительными требованиями, предъявляемыми заказчиками, которые нередко ужесточают их [11]. Стандарты являются эталоном, мерой качества, и регламентируют количественные показатели основных свойств, совокупность которых позволяет установить соответствие продукции основному назначению [12].

Качество рельсового металла в значительной мере определяется содержанием, формой, видом, размером и распределением в нем неметаллических включений [13], что в свою очередь зависит от химического состава и технологии производства стали [14].

Содержание неметаллических включений, характер их распределения, размер и природа образования [15,16-18] негативно влияют на механические свойства металлопродукции (прочность, пластичность, ударную вязкость металла, обрабатываемость на режущих станках), коррозионную стойкость, склонность к образованию трещин и другие характеристики стали [19-22]. Включения также снижают сопротивление к водородному растрескиванию, что чрезвычайно важно для рельсового металла [23].

Влияние неметаллических включений на разрушение затвердевших сплавов огромно, при этом все современные сплавы содержат значительное количество неметаллических включений. По данным Л.И. Леви [24], например, в 1 см³ железоуглеродистого сплава насчитывается около пяти миллионов различных частиц или 0,1÷0,2% по объёму [25]. Присутствующие в затвердевшем сплаве

включения нарушают течение металла при деформации и влияют на перераспределение дефектов структуры [26].

В недеформированном металле вокруг частиц включений возникают остаточные напряжения, что связано:

- с разными коэффициентами теплового расширения металла и неметаллической частицы;
- с различием упругих постоянных металла и неметаллических включений.

При растяжении-сжатии металла напряжения на границе раздела в 2,0-2,18 раз больше, чем в основном металле [15].

Дополнительно ухудшаются механические свойства при:

- формировании включений многогранной формы с острыми вершинами, что приводит к значительному увеличению концентраторов напряжений;
- увеличении содержания неметаллических включений в стали;
- увеличении линейных размеров включений;
- повышении прочности материала включений;
- различиях кристаллических решеток включения и окружающего металла.

В настоящее время признаками классификации неметаллических включений являются: природа происхождения, химический и минералогический состав, строение, механические и физические характеристики [27].

Оксидные включения – наиболее обширная группа, входящие в нее включения могут состоять из отдельных оксидов и представлять собой комплексные соединения, в данную группу входят кристаллические и аморфные включения [27]. Наиболее распространенными и опасными включениями являются оксиды и сульфиды. Фосфидные и нитридные включения встречаются крайне редко. Интерметаллидные и карбидные включения относят к включениям условно [28].

Разделение включений по химическому составу является условным, часто образуются сложные включения, представляющие собой сочетание включений различных групп [29].

Неметаллические включения по способности к деформации делят на три класса [13]:

- недеформируемые глобулы (например, SiO_2);
- недеформируемые оксиды, дробящиеся в строчки (корунд Al_2O_3), алюминаты кальция $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$, шпинели $\text{MnO} - \text{Al}_2\text{O}_3$;
- пластичные сульфиды и силикаты.

Наиболее опасными с точки зрения разрушения металла являются твердые и остроугольные включения зерен корунда. Опасны также крупные включения: строчки алюминатов и алюмосиликаты размером от 100 до 300 мкм [13].

По происхождению, включения делятся на эндогенные и экзогенные. Эндогенные включения формируются в результате взаимодействия кислорода, азота, растворенных в стали и серы с металлами, раскислителями и десульфураторами или в результате снижения растворимости элементов при переходе из жидкого в твердое состояние [30].

Включения могут находиться в жидком или твердом состоянии в зависимости от температуры плавления [15]. Основными раскислителями являются марганец и кремний, реже применяют титан, цирконий, церий и другие элементы. Образующиеся продукты реакции в стали находятся во взвешенном состоянии и не могут быть удалены из расплава в связи с незначительным размером частиц. Важную роль в удалении данных включений играет межфазная энергия на границе металл - включение [31].

Если продукты раскисления легкоплавкие, то при условии их коагуляции они относительно легко всплывают на поверхность металла. Если же образующиеся в результате раскисления стали соединения являются дисперсными твердыми включениями, то коагуляция таких частиц почти исключена, но всплывание их происходит довольно быстро вследствие незначительного смачивания их металлом [26].

Экзогенные неметаллические включения – частицы различных соединений, попавшие в жидкую сталь, или в слиток извне, т.е. из шихтовых материалов, огнеупорной футеровки агрегатов и т.д. [18]. Они имеют большие размеры (более 20 мкм), а их содержание составляет 15...25 % от общего содержания включений в стали [32]. К основным методам борьбы с экзогенными включениями относят - совершенствование оборудования, огнеупорных материалов и т.д. [33].

Примерная доля экзогенных и эндогенных оксидных включений, поступающих в слиток, составляет, % [34]:

Металлическая шихта	20,4
Футеровка сталеплавильного агрегата....	0,5
Печной шлак.....	3,0
Футеровка ковша.....	3,0
Продукты раскисления.....	40,6
Продукты вторичного окисления.....	32,5

Исходя из условий формирования и путей попадания в сталь неметаллических включений, можно выделить четыре группы [29]:

- продукты раскисления жидкого металла. Это оксиды элементов-раскислителей и (в случае недостаточного раскисления) оксиды железа и легирующих элементов. Такие оксиды могут формировать сложные соединения как друг с другом, так и со шлакообразующими материалами;

- частицы огнеупорных материалов, образовавшихся в результате эрозии различных огнеупорных футеровок и компонентов в результате взаимодействия с жидкой сталью;

- частицы шлака, захваченные жидким металлом на различных стадиях технологического процесса;

- продукты реакции, которые образуются при диффузии газов в металлы (например, нитриды алюминия и титана).

Общая схема загрязнения стали неметаллическими включениями, образующиеся в металлургических агрегатах, представлена на рисунке 1.2 [12, 31, 35, 36].



Рисунок 1.2 – Общая схема источников загрязнения стали неметаллическими включениями

Загрязнение стали неметаллическими включениями, во время продувки металла в кислородном конвертере, происходит за счет поступления в металл оксидных включений: частиц, вносимых чугуном и скрапом, продуктов

разрушения футеровки, конденсированных продуктов реакций окисления примесей чугуна (SiO_2 , MnO , FeO), эмульгированных в металле частиц шлака (в результате механического перемешивания шлака с металлом струей кислорода и пузырями CO). Одновременно с этим происходит – рафинирование металла от включений в результате ассимиляции каплями шлака взвешенных в ванне мелких частичек и флотации включений пузырьками CO . Загрязненность кислородно-конвертерной стали оксидными включениями перед раскислением уменьшается при повышении температуры металла, снижении вязкости шлака, увеличении его поверхностного натяжения, подъеме фурмы, выдержке металла в конвертере [37].

Загрязнение стали неметаллическими включениями во время внепечной обработки металла происходит за счет разрушения футеровки ковша и образовавшимися продуктами реакции раскисления. Для облегчения условий всплытия неметаллических включений осуществляют технологические операции, направленные на изменение их формы и состава [38-42].

Загрязнение стали неметаллическими включениями в промежуточном ковше происходит в результате следующих процессов [15]:

- вторичное окисление стали в начале процесса непрерывной разливки;
- реакции с футеровкой промежуточного ковша и покровным шлаком;
- поступление шлака из сталеразливочного ковша в промежуточный ковш с последними порциями металла.

Наиболее эффективными способами снижения содержания неметаллических включений в жидкой стали являются: хорошее перемешивание при введении раскислителей в ковш, подача алюминия для раскисления в жидком состоянии, обработка стали синтетическими шлаками, вакуумирование и т.д. [43, 44].

Исходя из исследований [43], во время внепечной обработки уровень загрязненности неметаллическими включениями возможно снизить на 65-75 %, в промежуточном ковше – еще на 20-25 %, и в кристаллизаторе 5-10 % относительно максимально возможного.

В частности, в результате продувки стали в ковше аргоном [45] содержание включений снижается в среднем с 0,024 до 0,011 % и ниже до 0,005 % [46], при этом удаляются преимущественно глиноземные включения.

Во время процесса вакуумирования стали основным механизмом удаления неметаллических включений является агрегация и всплытие частиц при перемешивании стали пузырьками выделяющегося СО [47].

Эффективность мероприятий, реализуемых в процессе внепечной обработки, целью которых является рафинирование стали от неметаллических включений, может быть значительно снижена вследствие развитых процессов вторичного окисления стали в процессе непрерывной разливки [46, 48]. Промежуточный ковш является последней ёмкостью, где металл находится в жидком состоянии, поэтому необходимо максимально использовать возможности рафинирования металла от неметаллических включений в нем.

Неметаллические включения в промежуточном ковше удаляются из расплава преимущественно за счет всплытия к поверхности и коагуляции [49, 31, 50, 51]. При этом процесс удаления включений из жидкой стали состоит из нескольких стадий: укрупнение при вынужденном и конвективном перемешивании металла в ковше, всплытие из внутренних объемов и поглощение включений шлаком, находящимся на поверхности металла. Механизм удаления неметаллических включений обусловлен межфазными, диффузионными и гидродинамическими явлениями, развивающимися на границе неметаллического включения с расплавом [26].

Всплытие связано с действием на частицу архимедовых сил, что обусловлено разными плотностями стали и неметаллического включения. Скорость всплытия зависит от размеров частицы, ее агрегатного состояния (жидкие включения или твердые), формы и смачиваемости [31, 52].

По размеру, неметаллические включения, находящиеся в расплаве стали, принято разделять на крупные и мелкие [31, 53]. К крупным относят включения размером более 20 мкм. Разделение частиц на крупные и мелкие связано с тем, что включения размером меньше 20 мкм практически не удаляются из стали за

счет всплытия. Для данных частиц особое значение играют не гравитационные, а поверхностно – адсорбционные силы [54].

Под воздействием межфазных поверхностных сил всплывание мелких неметаллических включений в следствии разности плотностей полностью исключается, и они попадают в затвердевающую заготовку [31]. Удаление мелких включений из расплава возможно за счет коагуляции. При этом возможны три вида коагуляции: путем коалесценции (слияние жидких частиц), коагуляции (слияние твердых частиц), адгезии (прилипание жидких частиц к твердым).

Скорость частиц в расплаве зависит также от двух видов движения – броуновского (хаотичного) и вынужденного под действием сил гравитации. Скорость всплывания частиц незначительна пока их размер не достигнет 10^{-3} - 10^{-2} см [55].

Чрезмерное присутствие неметаллических включений, содержащихся в стали, приводит к образованию на поверхности и в глубине заготовок различных дефектов (продольных и поперечных поверхностных трещин, загрязнение поверхности заготовки, осевую химическую и точечную неоднородности) [12, 15, 32, 55-57].

Дефекты макроструктуры непрерывнолитой заготовки, связанные с загрязненностью стали неметаллическими включениями оцениваются по четырехбалльной шкале (таблица 1.7) [56]. Чем ниже балл, тем качественнее макроструктура непрерывнолитой заготовки.

К металлу ответственного назначения, в частности к рельсовому металлу, предъявляются особые требования по содержанию неметаллических включений [58]. Чистота рельсовой стали по неметаллическим включениям является одним из основных факторов, определяющих качество рельсов и долговечность их эксплуатации [59].

В зависимости от химического состава сталь может содержать включения различных видов (оксиды, сульфиды, нитриды), различающиеся по размерам, форме и распределению [60].

Таблица 1.7 – Оценка дефектов макроструктуры непрерывнолитой заготовки, связанных с загрязненностью стали неметаллическими включениями

Балл	Осевая химическая неоднородность	Точечная неоднородность	Продольные трещины	Поперечные трещины
1	Отдельные группы ликвационных точек	Диаметр точек не более 1 мм	Ширина трещин до 0,2 мм	Отдельные слегка начинающиеся ликвационные полосы
2	Большое количество ликвационных точек	Диаметр точек не более 1 мм и повышенное количество отдельных точек	Ширина трещин 0,2-0,5 мм	Более грубые ликвационные полосы и трещины, единичные или небольшими группами с величиной раскрытия до 0,5 мм
3	Отдельные грубые ликвационные пятна	Диаметр точек до 1 мм и отдельные скопления крупных точек диаметром более 2 мм	Ширина трещин 0,5-1 мм	Значительная пораженность групповыми ликвационными полосками и трещинами с величиной раскрытия от 0,5 до 1 мм
4	Много грубых ликвационных пятен	Диаметр точек менее 1 мм и много скоплений крупных точек диаметром 2 мм и более	Ширина трещин более 1 мм	Грубые ликвационные полосы и трещины с величиной раскрытия более 1 мм

Опыт эксплуатации железнодорожных путей показал, что магистральные рельсы, должны изготавливаться из сталей, в которых гарантировано отсутствие неметаллических включений [61-64]. Эти неметаллические включения являются одной из основных причин преждевременного снятия рельсов с железнодорожного пути в результате различных усталостных повреждений.

Известно [65], что при эксплуатации рельсов усталостные трещины зарождаются в местах сосредоточения строчечных сегрегаций оксидов. Присутствие неметаллических включений, вытянутых вдоль направления прокатки, в условиях воздействия внешней нагрузки, облегчает зарождение трещины и распространения ее вдоль включений (рисунок 1.3) [66].



Рисунок 1.3 – Зарождение трещины на оксидах (слева) и сульфиде марганца (справа)

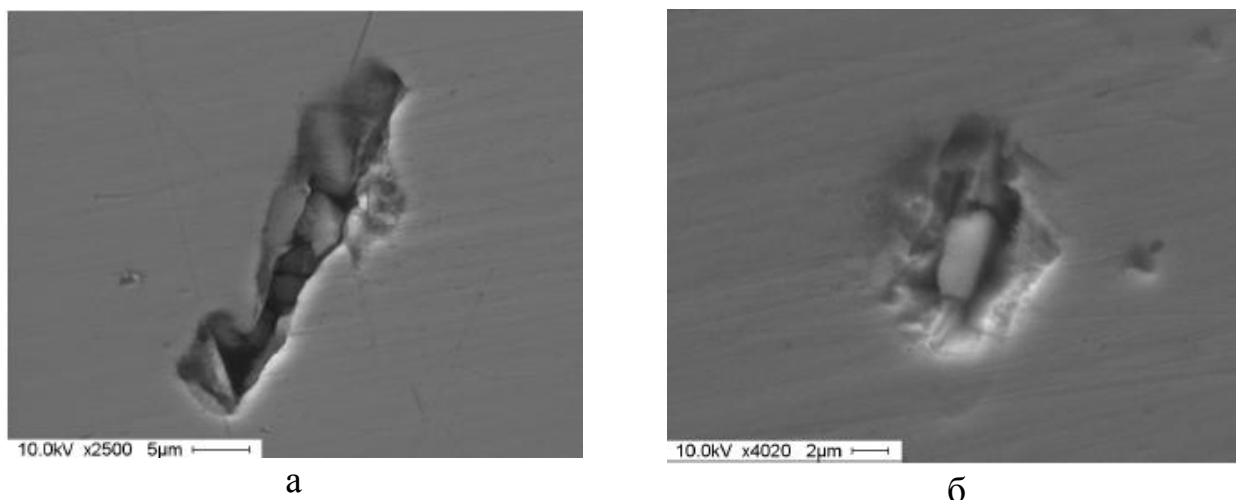
Из проведенных в последние годы исследований [67-69] следует, что наиболее негативное влияние на стойкость рельсов оказывает загрязненность стали хрупкоразрушенными оксидными включениями, в частности алюминатами кальция (рисунок 1.4) [70, 71]. Наличие скопления таких включений приводит к образованию контактно-усталостных дефектов в процессе эксплуатации рельсов.



Рисунок 1.4 – Алюминаты кальция в рельсовой электростали производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Сульфиды и силикаты недеформирующиеся, присутствующие в центральной зоне, оказывают значительное влияние на пластические свойства, в частности увеличивают скорость роста усталостных трещин, что приводит к разрушению металла значительно быстрее, чем в двух других зонах непрерывнолитой заготовки (НЛЗ) [72].

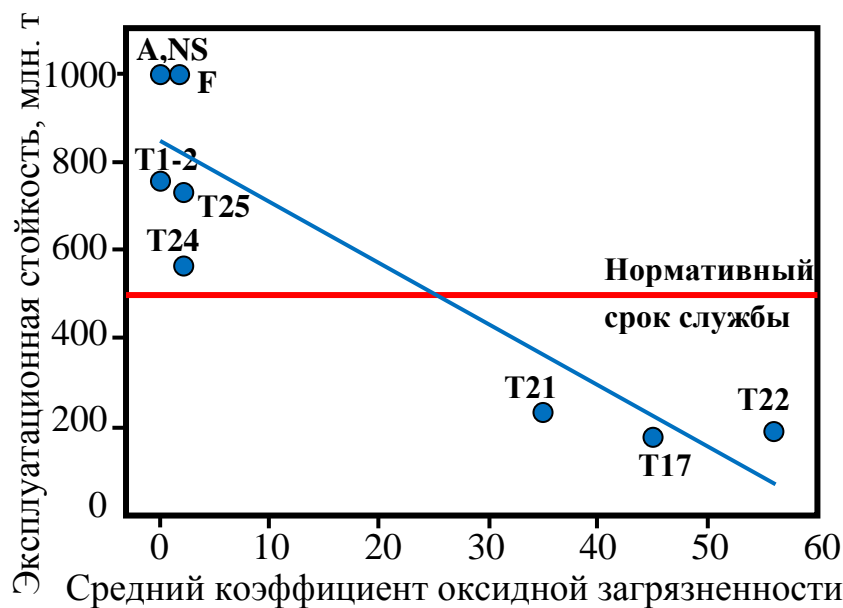
В исследованиях [59, 60, 73, 74] проведенных для условий выплавки рельсовой марки стали Э76Ф в ДСП АО «ЕВРАЗ ЗСМК» были определены баллы и типы неметаллических включений. Установлено, что во всех зонах НЛЗ присутствуют оксиды точечные (балл № 1), в корковой зоне присутствуют единичные включения нитридов алюминия (балл № 1), в зоне столбчатых кристаллов незначительное количество силикатов недеформирующихся (балл № 1). Наибольшее количество неметаллических включений различных видов расположены в центральной зоне НЛЗ, значительную часть составляют оксиды точечные (балл № 2, № 3, № 5), сульфиды (балл № 1, № 2, № 4), а также силикаты недеформирующиеся (балл № 1, № 4, № 5). Выявлены кристаллы корунда (α -модификация глинозема Al_2O_3), имеющие вид зерен неправильной формы или шестиугольников неправильной формы (рисунок 1.5, а) и большое количество сульфидов марганца (рисунок 1.5, б) [59].



а – корундовые включения; б – сульфиды марганца

Рисунок 1.5 – Растровые электронно-микроскопические снимки неметаллических включений в рельсовой стали Э76Ф выплавленной на АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

В настоящее время эксплуатационную стойкость железнодорожных рельсов можно оценить в зависимости от среднего коэффициента оксидной загрязненности (рисунок 1.6) [75] и объемной доли недеформируемых оксидных включений (рисунок 1.7) [75]. В работе [75] приведены результаты исследования качества рельсов опытных партий Т17, Т21, Т22, Т23, Т24, Т25, Т1-2 производства АО ЕВРАЗ «Нижнетагильский металлургический комбинат» и промышленных партий зарубежных фирм – японской «Nippon Steel Corporation» (NS), французской «Sogerail» (F), австрийской «Voest-Alpine» (A), показавших различную эксплуатационную стойкость при натурных испытаниях на экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ». Показателем эксплуатационной стойкости партий рельсов является 80 %-ый приведенный ресурс, равный массе пропущенных по рельсам грузов, при условии, что количество образовавшихся дефектных рельсов не должно превышать 20 % от общего количества рельсов, уложенных в путь. Нормативная стойкость рельсов определялась стандартом DIN 50602 [75].



На графике буквами и цифрами обозначается партия рельсов

Рисунок 1.6 – Зависимость эксплуатационной стойкости рельсов от среднего коэффициента оксидной загрязненности

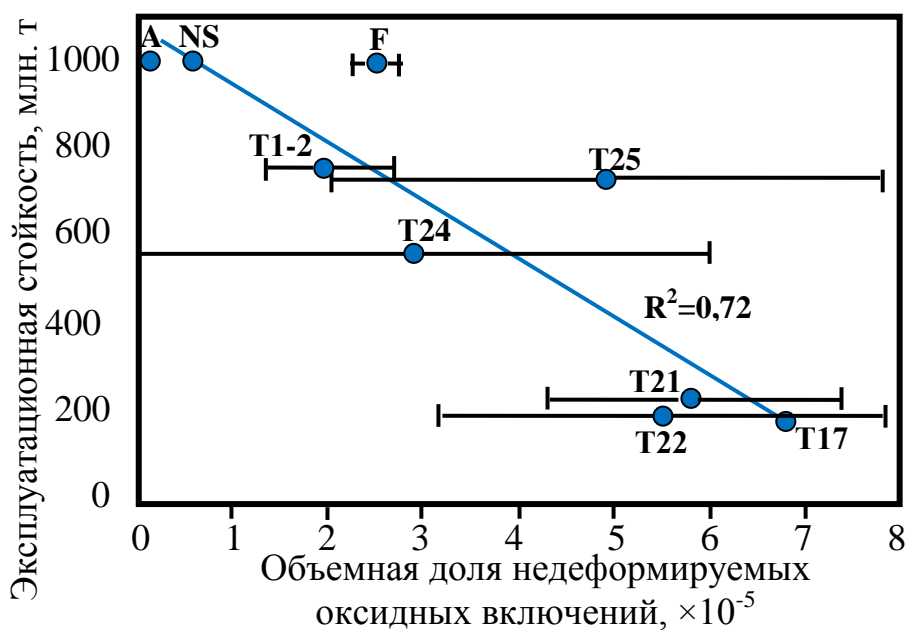


Рисунок 1.7 – Зависимость эксплуатационной стойкости рельсов от объемной доли недеформируемых оксидных включений в различных партиях рельсов

В настоящее время возможные пути повышения качества рельсов связаны с совершенствованием технологии их производства, включающей комплекс мероприятий по выплавке, внепечной обработке, разливке и термообработке

металла [76]. Постоянно ведутся работы по модернизации технологии непрерывной разливки рельсовой стали, нацеленные на повышение качества непрерывнолитой заготовки [77-79].

В работе [70] для условий АО «ЕВРАЗ ЗСМК» проведено исследование по влиянию длительности продувки металла в ковше во время выпечной обработки на установке «ковш-печь» на содержание общего кислорода в металле по 190 плавкам (рисунок 1.8).

Снижение содержания общего кислорода в стали при увеличении длительности продувки на АКП достигается за счет снижения содержания кислорода, связанного в неметаллические включения (хрупкоразрушенные оксиды) [70].

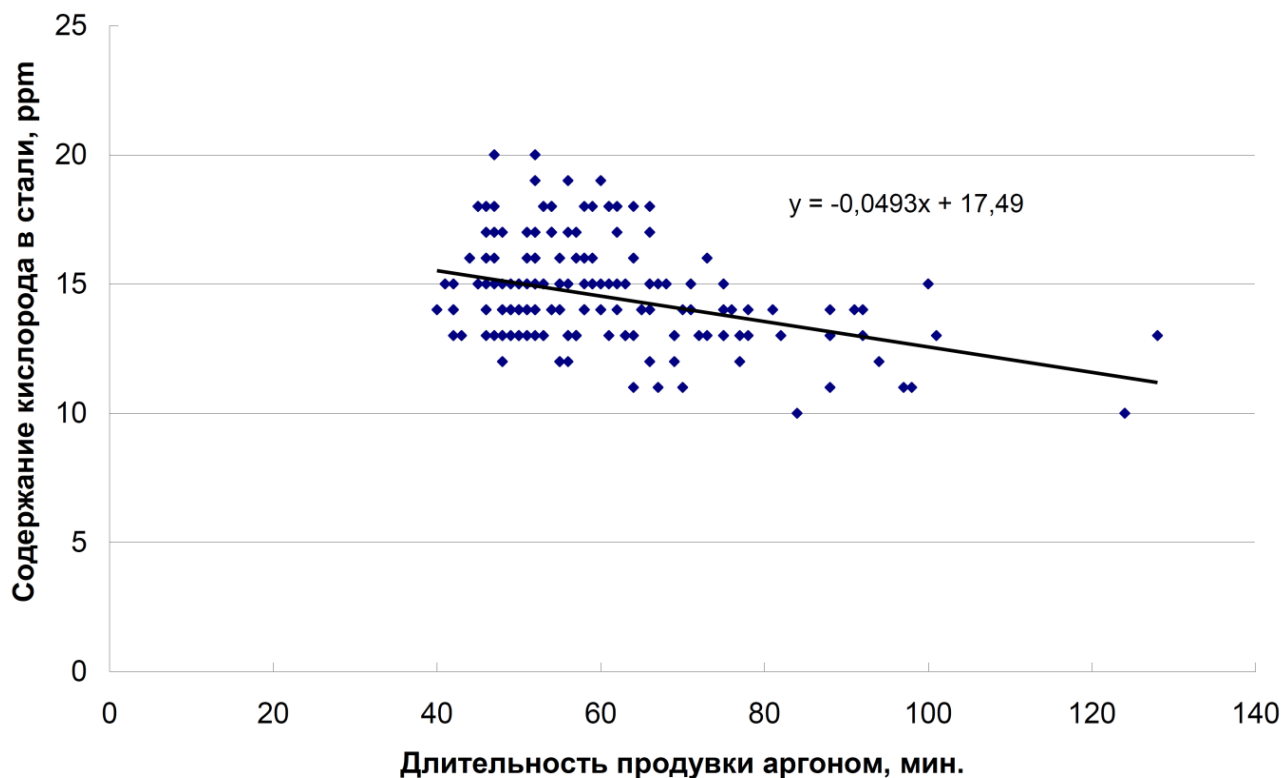


Рисунок 1.8 – Влияние длительности продувки аргоном при выпечной обработке стали на содержание кислорода в рельсах

Анализ производственных данных по загрязненности непрерывнолитой заготовки рельсовых марок стали на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» показал (рисунок 1.9), что уровень загрязненности неметаллическими включениями на некоторых плавках значительно превышает допустимый.

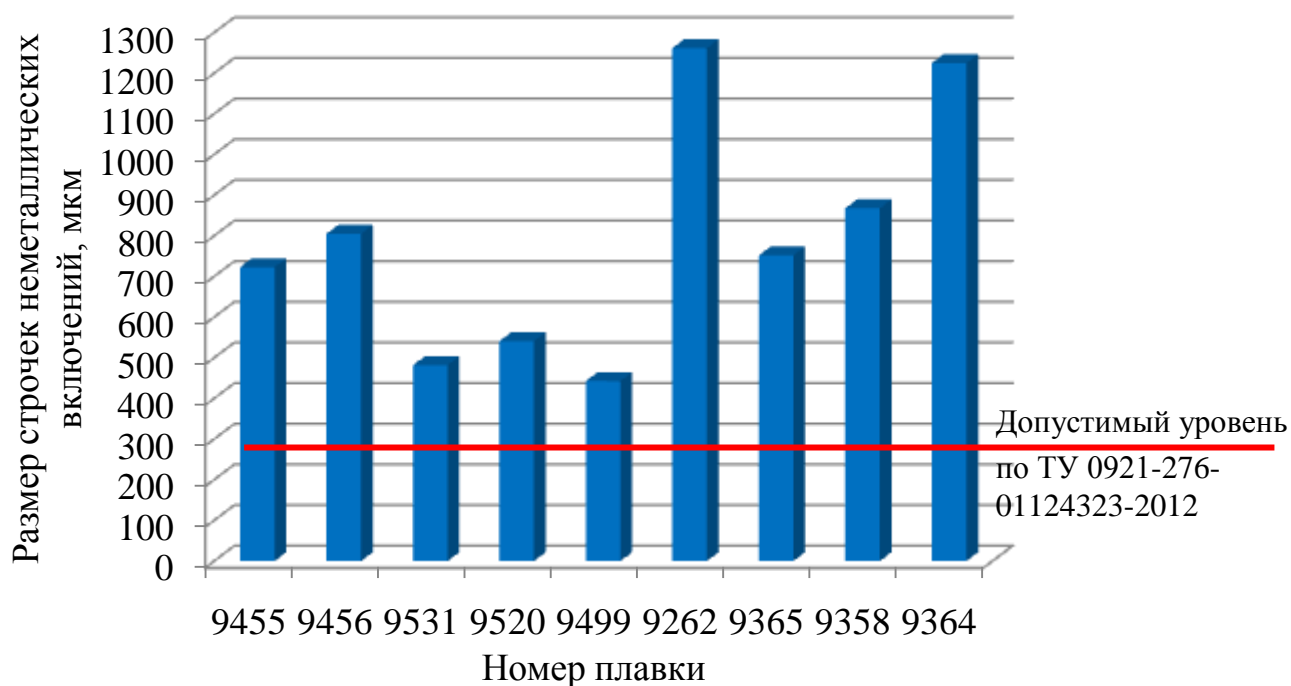


Рисунок 1.9 – Уровень загрязненности рельсов производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» неметаллическими включениями

Помимо рафинирования металла при внепечной обработке целесообразно также удалять неметаллические включения в промежуточном ковше - ключевом агрегате непрерывной разливки стали, где определяющими являются процессы гидродинамики металлического расплава.

1.3 Способы рафинирования металлического расплава в промежуточном ковше машины непрерывного литья заготовок

В современной системе технологий промежуточный ковш МНЛЗ рассматривается как один из важнейших элементов, который непосредственным образом влияет на качество непрерывнолитой заготовки [80]. Базовые функции промежуточного ковша заключаются в распределении стали по ручьям МНЛЗ, усреднении химического состава и поддержании стабильной скорости разливки [80]. Промежуточный ковш современной МНЛЗ можно рассматривать как металлургический агрегат непрерывного действия для дополнительного внепечного рафинирования стали и повышения её качества [81].

Для реализации технологического потенциала процесса рафинирования необходимо обеспечить оптимальную конструкцию промежуточного ковша, которая должна удовлетворять следующим требованиям [26]:

- обеспечивать достаточно продолжительное время пребывания стали, необходимое для всплытия неметаллических включений к покровному шлаку;
- не создавать застойных зон в объеме промежуточного ковша, вызывающих неравномерное распределение температуры и концентрации неметаллических включений;
- потоки металла в промежуточном ковше не должны вызывать колебания открытой поверхности и появления незащищенных участков, способных вызвать повторное окисление стали.

Усовершенствование конструкции промежуточного ковша может обеспечить повышение показателей чистоты стали, уменьшение массы остатков металла, снижение турбулентности, а также увеличение срока службы футеровки [82].

Известен целый ряд революционных решений, включающих подогрев и вакуумирование стали в промежуточном ковше, обработку расплава порошковыми проволоками, применение электромагнитного перемешивания и т. д. [31, 83-91]. Применение данных технологий требует значительных материальных затрат, а также соответствующей научной и технической базы, поскольку необходима замена типового промежуточного ковша на уникальный металлургический агрегат [15].

В настоящее время наиболее перспективным для российских металлургических предприятий направлением развития, является модернизация существующих, типовых промежуточных ковшей МНЛЗ с учетом имеющихся у предприятий ресурсов [92].

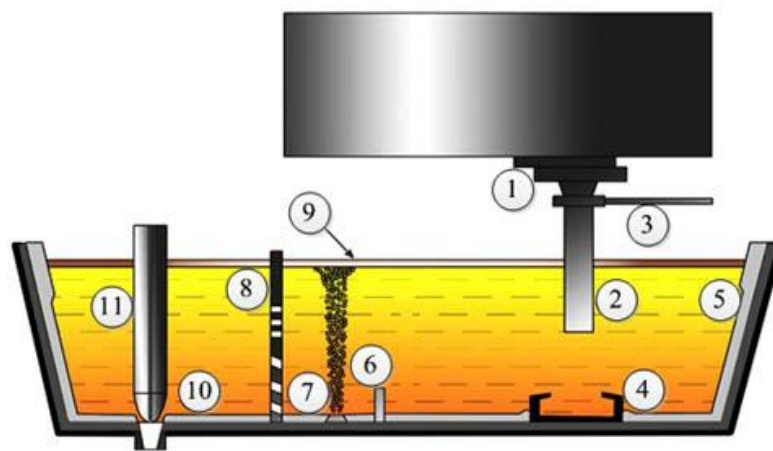
Использование в промежуточных ковшах гидродинамических огнеупорных элементов позволяет изменять параметры течения расплава в агрегате, создавая благоприятные условия для рафинирования металла от неметаллических

включений, что является актуальной задачей для металлургических предприятий [93].

Можно выделить несколько основных видов технических решений, широко используемых в отечественной практике и зарубежом:

- фильтрационные перегородки, для организации движения потоков расплава и улавливания неметаллических включений;
- струегасители, обеспечивающие прием струи металла, поступающей из сталеразливочного ковша и ее торможение;
- продувочные блоки, для осуществления флотации неметаллических включений;
- пороги и перегородки для организации направленного движения потоков расплава и устранения «коротких» путей.

Общая схема использования различных решений для организации потоков металла в промежуточном ковше представлена на рисунке 1.11 [80].



- 1 – шиберный затвор сталеразливочного ковша; 2 – защитная труба;
 3 – аргонная защита; 4 – струегаситель; 5 – рабочий слой футеровки;
 6 – порог; 7 – продувочный блок; 8 – фильтрационная перегородка;
 9 – теплоизолирующая смесь; 10 – стакан-дозатор; 11 – стопор-моноблок

Рисунок 1.11 – Общая схема использования различных решений для организации потоков металла в промежуточном ковше

Дополнительная фильтрация стали от неметаллических включений получила развитие в Японии, США, Германии. Фильтрация основана на принципе осаждения неметаллических включений на сетевых фильтрах, кеке или толстослойных фильтрах [94].

На рисунке 1.12 представлена конструкция перегородки с фильтром, разработанная в США [95].

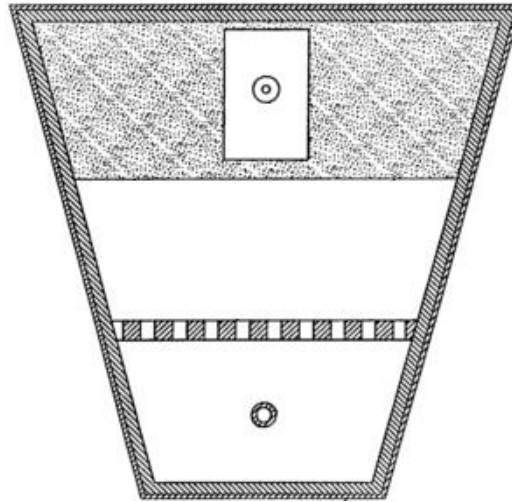


Рисунок 1.12 – Конструкция перегородки с фильтром

Принцип рафинирования металла путем коагуляции включений и их дальнейшей сепарации может быть реализован при использовании самоочищающихся фильтров, рабочее пространство которых служит не для осаждения включений, а для их коагуляции. Благоприятные условия для коагуляции включений создаются в результате турбулизации потоков в щелях фильтра [94, 95].

Основным недостатком фильтров является ограничение срока службы, что усложняет их применение при разливке крупнотоннажных плавов [94].

Для организации движения потоков расплава в промежуточном ковше на место падения струи металла устанавливается струегаситель, который одновременно выполняет функции защиты бойного места, торможения струи расплава и организации распределения потоков металла по ручьям.

Принцип работы струегасителя заключается в том, что поток металла попадая во внутренний объем струегасителя (рисунок 1.13), теряет часть своей кинетической энергии и далее направляется к разливочным стаканам [96].

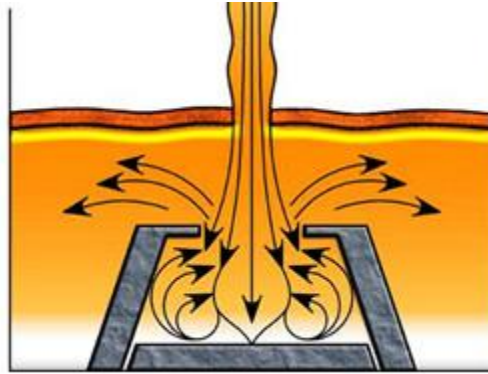
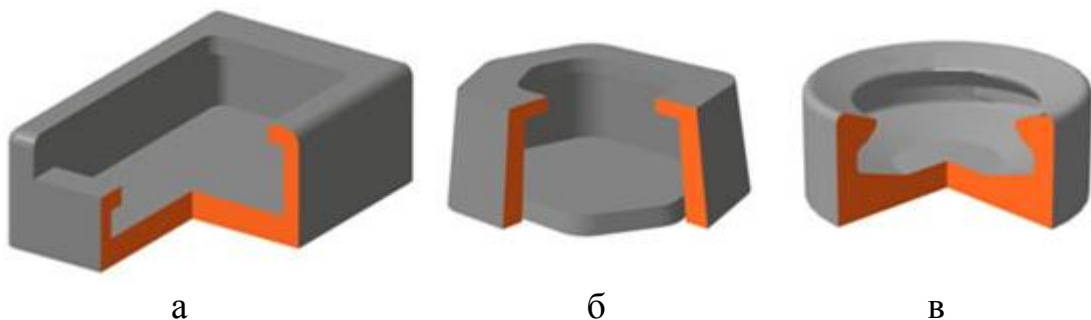


Рисунок 1.13 – Схема движения потоков расплава в объеме струегасителя

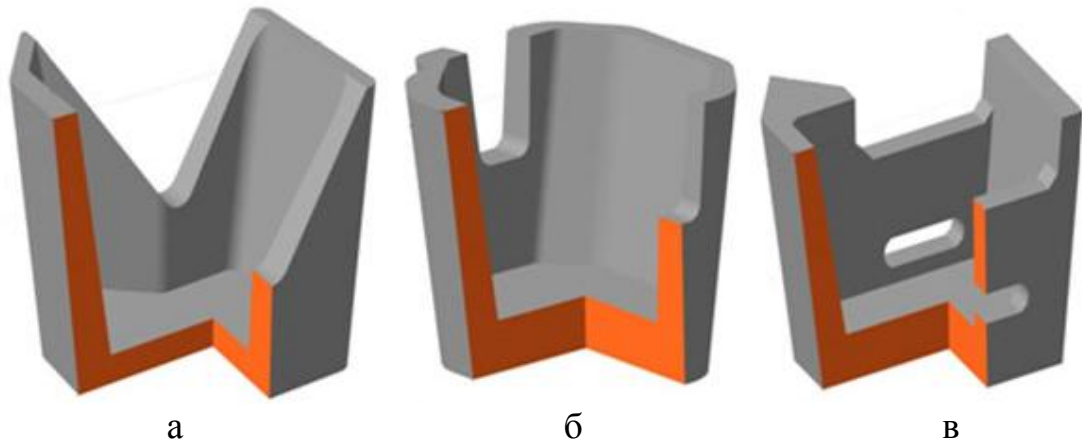
Совершенствование конструкции струегасителей активно осуществлялось на протяжении последних 20 лет различными фирмами (Vesuvius, Fosco и др.) [97-111], при этом было реализовано множество конструктивных решений (прямоугольного сечения, круглого, многогранного, с внутренним рельефом и дополнительными элементами внутри струегасителя).

Современные струегасители возможно разделить на два основных типа [80], различающиеся по высоте рабочего пространства: «турбостоп» (рисунок 1.14) и «колодец» (рисунок 1.15).



а – «Fosco» (масса 295 кг); б – «Calderys» (масса 200 кг); в – «RHI» (масса 170 кг)

Рисунок 1.14 – Металлоприемники типа «турбостоп» различных фирм производителей



а – «Dalmond» (масса 1240 кг); б – «Calderys» (масса 1350 кг);

в – «Corvintek» (масса 1180 кг)

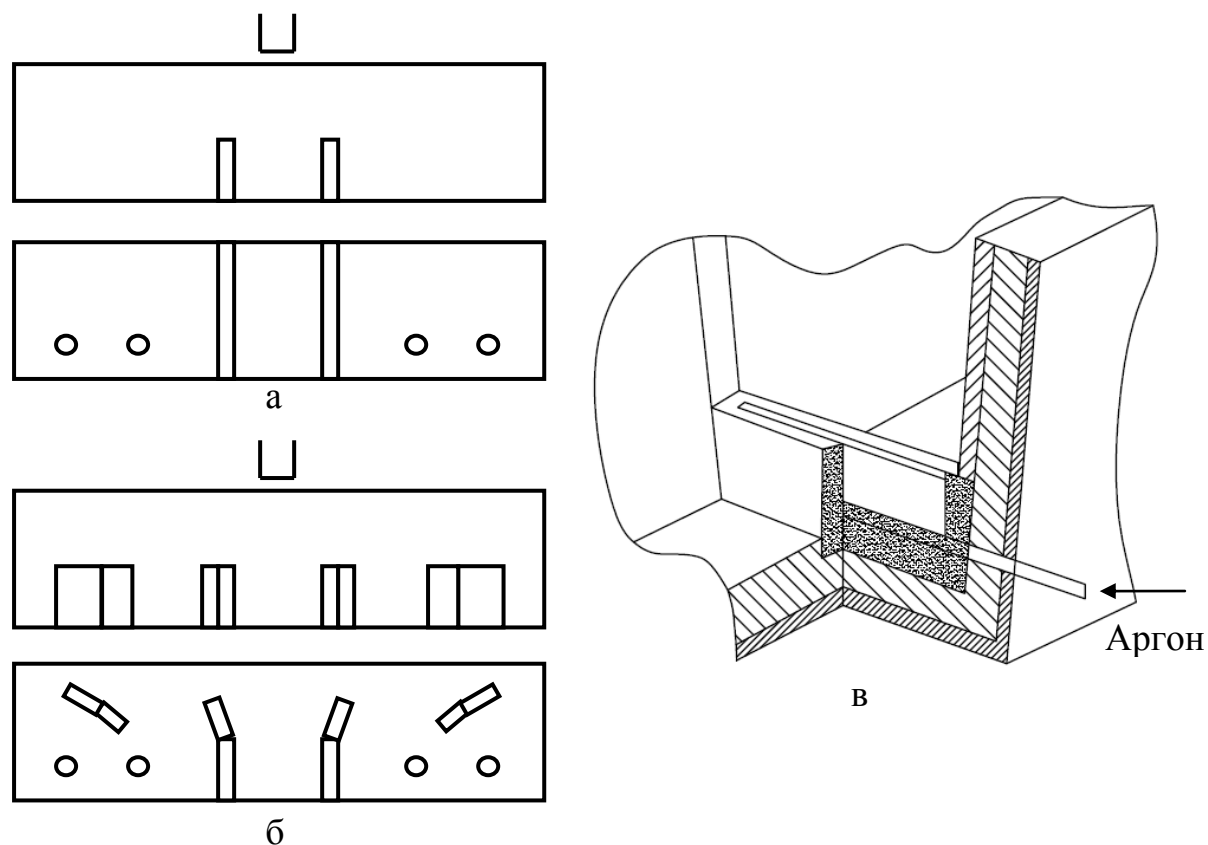
Рисунок 1.15 – Металлоприемники типа «колодец» различных фирм производителей

«Турбостоп» – предназначен для гашения кинетической энергии струи, а «колодец» – для защиты стенок и днища промежуточного ковша и перенаправления потоков к ручьям. При этом, использование металлоприемника «турбостоп» рекомендуется при разливке закрытой струей, «колодец» – при разливке открытой струей [80].

Помимо струегасителей на металлургических предприятиях часто применяются пороги [49], позволяющие создать восходящие потоки стали и обеспечивающие прием первой холодной порции металла в многоручьевых промежуточных ковшах, а также способствующих выравниванию времени распределения металла по ручьям промежуточного ковша [112].

Пороги могут быть прямолинейными (рисунок 1.16, а) или угловыми (рисунок 1.16, б). В теле порогов может выполняться газорафинирующее устройство, например в виде щелевого сопла (рисунок 1.16, в) [113].

Расположение порогов выбирается индивидуально, в зависимости от геометрических параметров конструкции промежуточного ковша и технологических параметров процесса разливки стали [80]. Как правило, пороги используют совместно с другими гидродинамическими устройствами – перегородками и струегасителями [114, 115].



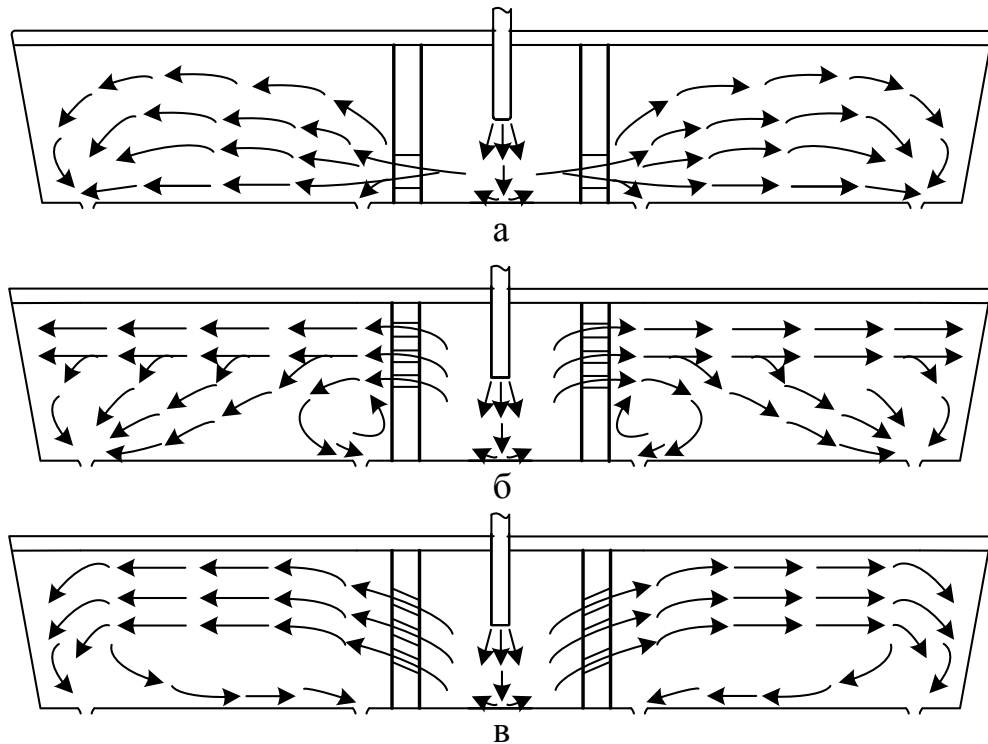
а – прямолинейные; б – угловые; в – с щелевым соплом

Рисунок 1.16 – Пороги промежуточных ковшей

В настоящее время широкое распространение среди гидродинамических устройств получили полнопрофильные перегородки с переливными отверстиями, о чем свидетельствует большое количество публикаций с описанием конструкций и принципов их работы [12, 31, 81, 116-120].

Перегородки разделяют объем промежуточного ковша на две или более камер (рисунок 1.17). Приемную, в которую поступает металл из сталеразливочного ковша, и разливочные, в которых происходит циркуляция металла и его распределение по ручьям МНЛЗ. Истечение металла в разливочные камеры осуществляется через переливные отверстия (рисунок 1.17) [113].

Затопленные струи, поступающие в разливочные камеры, за счет градиента давления от оси струи к периферии, увлекают неметаллические включения, чем и достигается рафинирующий эффект перегородок. От расположения, размеров и формы отверстий зависит эффективность рафинирования металла [113].



а – в нижней части; б – в верхней части; в – в нижней части под углом

Рисунок 1.17 – Варианты расположения отверстий в перегородках

Установка перегородок, в которых выполнены одно или два отверстия большого диаметра (рисунок 1.17, а) создает схему движения металла, при которой условия всплытия неметаллических включений ухудшаются [113]. При выполнении в теле перегородки нескольких горизонтальных цилиндрических отверстий (рисунок 1.17, б) создаются благоприятные условия для рафинирования стали затопленными струями, однако при работе ковша не обеспечивается равномерное распределение скоростей истечения стали из разливочных стаканов. Когда цилиндрические отверстия сделаны под некоторым углом к зеркалу металла, создаются наиболее благоприятные условия для рафинирования стали (рисунок 1.17, в) [113].

В разливочных камерах промежуточного ковша должно обеспечиваться направление потоков металла к рафинировочному шлаку и распределение скоростных полей и давлений, которые способствовали бы максимальному удалению неметаллических включений. Поэтому основным средством

воздействия на удаление включений является рациональная схема распределения затопленных струй в разливочных камерах ковша [113].

Высоких показателей эффективности рафинирования расплава добиваются также совместным использованием нескольких рафинирующих устройств [96]. Комбинации различных гидродинамических устройств образуют систему, которую можно назвать системой распределения потоков стали (СРП) [96]. Хорошие результаты показала система, состоящая из гидродинамических фильтрационных элементов с каналами, устанавливаемыми на нескольких горизонтах перегородки ковша в сочетании с продувкой инертным газом. Промышленное внедрение данной технологии рафинирования на АО «МК «Азов-сталь» и АО «МК им. Ильича» позволило снизить содержание неметаллических включений в 2-2,5 раза, повысить прочностные характеристики металлопроката при отрицательных температурах на 12-15 % [31].

В ККЦ АО «ММК» в результате использования продувочных устройств в промежуточных ковшах достигнуто снижение «точечной неоднородности», загрязненности по шлаковым включениям. Повысился выход годного металла за счет снижения технологической обрезки от «поясов» на 4 кг/т. [121]. Позже успешно прошли опытно-промышленные испытания полнопрофильных перегородок, что позволило уменьшить содержание в металле неметаллических включений и улучшить качество разливаемой стали, увеличить производительность установки непрерывной разливки стали на 1-2% [122].

В 2013 году в условиях литейно-прокатного комплекса филиала АО «ОМК-Сталь» опробована комплексная технология рафинирования металла в промежуточном ковше тонкослябовой МНЛЗ, оборудованного струегасителем и продувочным блоком для продувки металла аргонem [123]. В результате удалось уменьшить загрязненность металла неметаллическими включениями в среднем по силикатам хрупким на 15 % отн., а по силикатам недеформирующимся на 22 % отн.

Для рельсового металла кроме неметаллических включений важным является минимальное содержание водорода. Водород в сталях проявляет

склонность к локализации [124]. При этом водород стремится к сегрегации в дефектах кристаллического строения, в том числе на границах матрица – неметаллическое включение. Известно, что неметаллические включения способствуют развитию водородных трещин [123]. Негативное влияние водорода на свойства сталей характеризуется не только его взаимодействием с кристаллической решеткой железа, но и с неметаллическими включениями [125]. При снижении пластичности сталей, вызванной присутствием водорода, разрушения зарождаются около неметаллических включений [126].

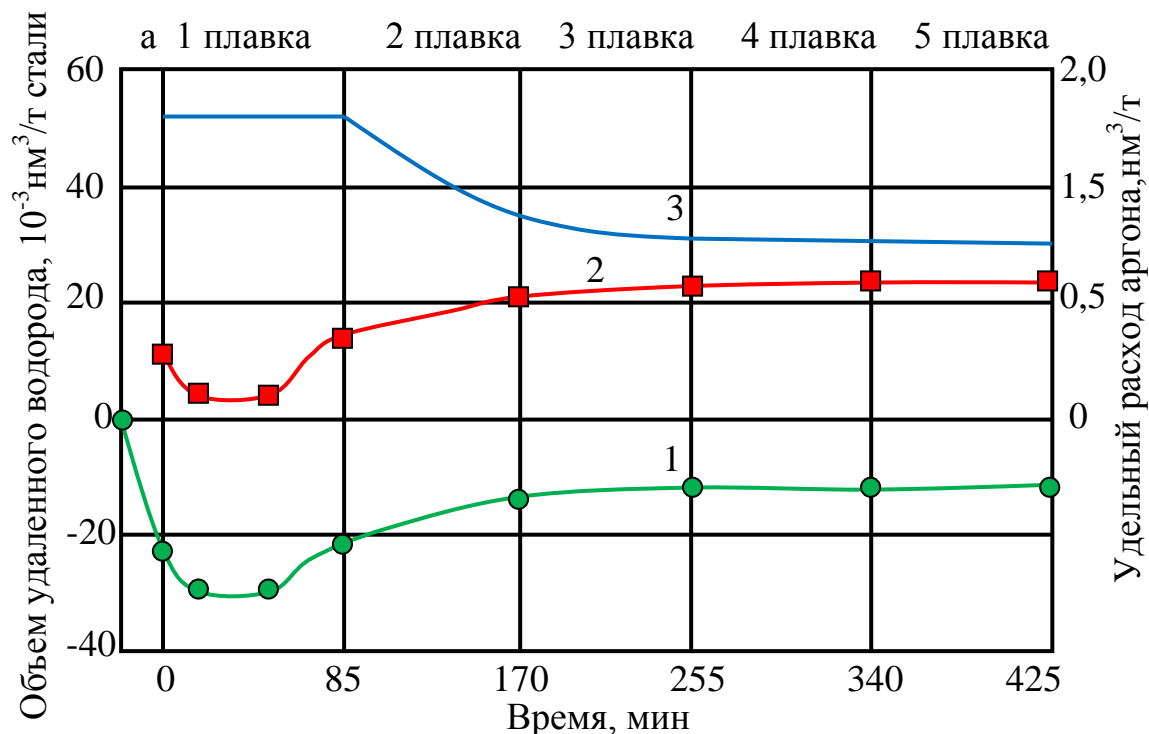
По мнению авторов работы [127] основными источниками поступления водорода в сталь во время непрерывной разливки являются материалы футеровки промежуточного ковша и материалы шлакообразующих смесей, при содержании в них связанной и свободной влаги. Поглощение водорода сталью в промежуточном ковше происходит также при растворении водяного пара в шлаковой фазе и на поверхности неметаллических включений увлекаемых потоками металла вниз в результате чрезмерной их циркуляции. Данные процессы приводят к повышению концентрации водорода в стали в промежуточном ковше с 0,5 до 3-5 ppm и более, особенно вначале серии [128].

Авторами работы [127] доказана возможность снижения концентрации водорода в металле в промежуточном ковше при подаче аргона через днище (рисунок 1.18), за счет экстрагирования пузырьками аргона водорода из жидкой стали.

По мнению авторов работы [129] не существует универсальных решений и рекомендаций для выбора оптимальных геометрических параметров промежуточных ковшей и струегасителей. Выбор конструктивных решений для струегасителей должен осуществляться в привязке к конкретным решениям с использованием методов физического и математического моделирования [6, 96, 124].

Перенос разработанных технологических решений по использованию в объеме промежуточного ковша гидродинамических элементов с конкретными конструктивными параметрами на другой промежуточный ковш, без учета

специфики внутренней геометрии и проведения исследований гидродинамических картин, может не только не повысить чистоту стали по неметаллическим включениям, но и привести к отрицательным результатам [124].



а – период подачи стали в промежуточном ковше; 1 – данные плавки текущего производства; 2 – результаты расчетов для варианта продувки аргоном с расходом $2,1 \text{ м}^3/\text{т}$; 3 – желательный режим ввода аргона для получения гарантированного низкого (менее 2 ppm) содержания водорода в металле

Рисунок 1.18 – Баланс удаленного и поглощенного сталью водорода в промежуточном ковше МНЛЗ в ходе разливки первых пяти плавков непрерывной серии

Для разработки систем распределения потоков (СРП) металла в промежуточном ковше в настоящее время широко используются методы физического [81, 96, 124] и численного моделирования [130], позволяющие без значительных затрат проводить исследование гидродинамических процессов в промежуточном ковше.

Выводы и постановка задач исследования

Учитывая современное состояние вопроса повышения качества рельсовой металлопродукции в настоящей работе поставлены следующие задачи исследования:

Основные задачи:

1) Адаптировать для условий применения к промежуточным ковшам МНЛЗ метод исследования распределения времени пребывания жидкости в агрегате (проточном реакторе непрерывного действия) для оценки эффективности рафинирования расплава стали от неметаллических включений.

2) Разработать и сконструировать с учетом требований физического моделирования лабораторный комплекс для исследований гидродинамических процессов в промежуточном ковше МНЛЗ.

3) Исследовать с использованием трехмерной математической модели гидродинамику расплава стали в промежуточных ковшах МНЛЗ различных конструкций и конфигураций внутреннего объема.

4) Выполнить комплексное исследование влияния гидродинамических устройств (пороги, струегасители, перегородки) различных конфигураций на процессы движения расплава.

5) Установить на основе теоретических и экспериментальных исследований зависимости и закономерности движения расплава при рафинировании металла в промежуточном ковше.

6) Разработать рациональную конструкцию и конфигурацию внутреннего объема промежуточного ковша четырехручьевого МНЛЗ, обеспечивающие эффективное рафинирование расплава стали от неметаллических включений.

7) Провести промышленное апробирование результатов исследований в технологической практике производства стали в условиях АО «ЕВРАЗ Западно-Сибирский металлургический комбинат» и внедрить их учебный процесс при подготовке студентов, обучающихся по направлению 22.03.02 – Металлургия.

2 Установка и методики исследования процессов рафинирования стали при непрерывной разливке

2.1 Физическое моделирование процессов гидродинамики в промежуточном ковше машины непрерывного литья заготовок

2.1.1 Анализ условий подобия исследуемых процессов

Достоверное математическое описание гидродинамических процессов в промежуточном ковше приводит к решению достаточно сложных задач [131]. При этом адекватность математической модели, как правило, проверяется сопоставлением с результатами физического моделирования, в связи с этим оптимальным является проведение комплексных исследований методами физического и математического моделирования [132].

Множество современных усовершенствований (применение порогов, струегасителей, перегородок и т.д.) в промежуточных ковшах на металлургических предприятиях, явились результатом лабораторных экспериментов на гидравлических моделях [43] и позволили сгладить флуктуации потоков расплава и снизить количество неметаллических включений в металле [133-136].

Требования, необходимые для соблюдения подобия физической модели оригиналу следуют из третьей теоремы подобия:

- наличие геометрического подобия;
- процессы в модели и оригинале должны описываться одинаковыми дифференциальными уравнениями (т.е. относиться к одинаковому классу физических явлений);
- подобие начальных и граничных условий;
- числа подобия должны быть идентичны.

Достоверные результаты исследований на физических моделях могут быть получены при соблюдении геометрического, кинематического и динамического подобия [2, 137, 138].

Геометрическое подобие образца и модели по основным параметрам объема промежуточного ковша осуществляется с соблюдением условия:

$$\frac{H_{\text{ПК}}}{H'_{\text{ПК}}} = \frac{L_{\text{ПК}}}{L'_{\text{ПК}}} = \frac{B_{\text{ПК}}}{B'_{\text{ПК}}} = \dots = \frac{d_{\text{ВХ}}}{d'_{\text{ВХ}}} = \frac{d_{\text{ВЫХ}}}{d'_{\text{ВЫХ}}} = M_1, \quad (2.1)$$

где $H_{\text{ПК}}$, $L_{\text{ПК}}$, $B_{\text{ПК}}$ – высота, длина и ширина рабочего пространства промежуточного ковша, соответственно, м;

$d_{\text{ВХ}}$ – внутренний диаметр защитной трубы сталеразливочного ковша, м;

$d_{\text{ВЫХ}}$ – внутренний диаметр разливочного стакана промежуточного ковша, м;

M_1 – константа геометрического подобия линейных величин.

Здесь и далее $H'_{\text{ПК}}$, $L'_{\text{ПК}}$, $B'_{\text{ПК}}$ и т.д. относится к обозначениям для физической модели.

Выполнение условия (2.1) обеспечивает постоянство соотношения площадей и объемов геометрически подобных лабораторного и промышленного промежуточного ковша:

$$\frac{S_{\text{ПК}}}{S'_{\text{ПК}}} = M_1^2, \quad (2.2)$$

$$\frac{V_{\text{ПК}}}{V'_{\text{ПК}}} = M_1^3, \quad (2.3)$$

где $S_{\text{ПК}}$ – площадь поверхности металла в промежуточном ковше, м²;

$V_{\text{ПК}}$ – объем металла в промежуточном ковше, м³.

Поскольку жидкая сталь является ньютоновской жидкостью и при этом абсолютно несжимаемой и неразрывной, а её движение является результатом сил действующих на неё, то количественное описание течения стального расплава должно базироваться на принципах сохранения импульса. На жидкую сталь действуют силы оказывающие воздействие через поверхность (давление,

напряжение сдвига и др.) или действующие в объеме (плавучесть, сила тяжести и др.). Второй закон Ньютона позволяет составить уравнения баланса сил для каждой отдельной фазы. Для однофазного непрерывного потока (рисунок 2.1), на который действуют силы инерции, давления, гравитации и силы вязкого трения второй закон Ньютона можно представить в векторной форме [139]:

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} = - \left[\nabla \cdot \rho \vec{V} \vec{V} \right] - \nabla P - [\rho \vec{g}], \quad (2.4)$$

где ρ – плотность жидкости;

\vec{V} – вектор скорости;

t – время;

∇ – оператор набла;

P – давление;

τ – напряжение сдвига;

g – ускорение свободного падения.

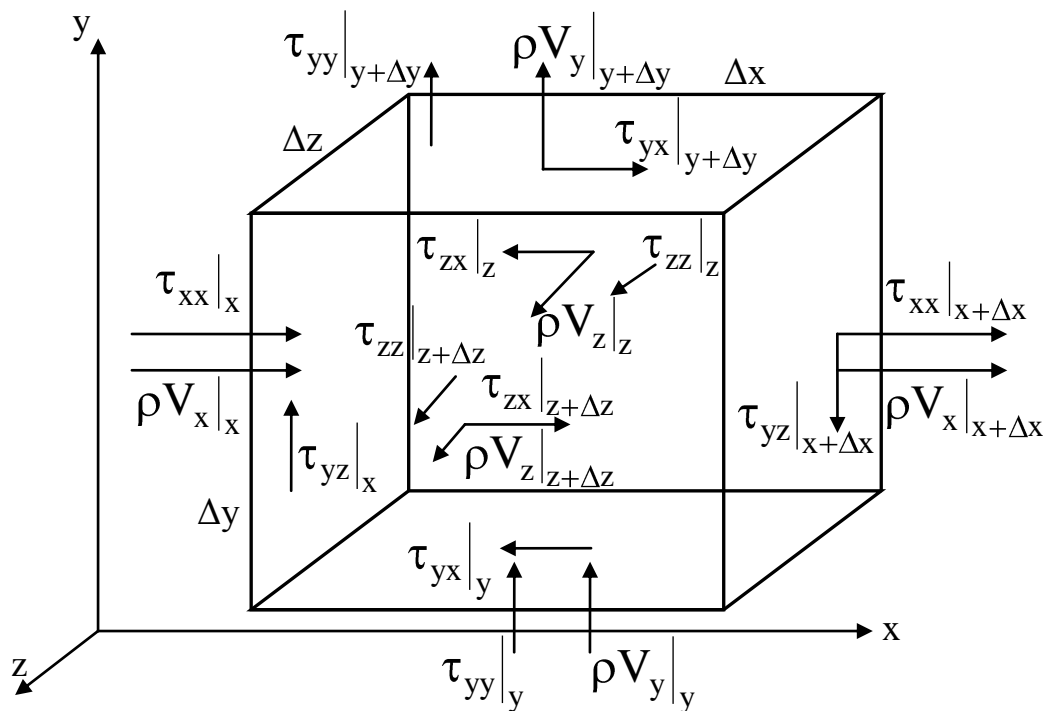


Рисунок 2.1 – Сохранение импульса в бесконечно малом объеме жидкости, в котором действуют силы инерции, гравитации, давления и силы вязкого трения

Уравнение неразрывности или баланса массы для уравнения (2.4) можно записать следующем образом:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\nabla \cdot \rho \vec{V}), \quad (2.5)$$

Замена напряжения сдвига (τ) соответствующими градиентами скорости в уравнении (2.4) позволит выразить уравнение сохранения сил или импульсов только по компонентам скорости, а не по скорости и напряжению сдвига.

Движение вязкой несжимаемой жидкости в трехмерном пространстве, в поле массовых сил, в декартовой системе координат примет вид системы уравнений Навье-Стокса [139, 140, 141]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x V_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_x V_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_x V_z) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \\ + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_{\text{эф}} \frac{\partial V_x}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_{\text{эф}} \frac{\partial V_x}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_{\text{эф}} \frac{\partial V_x}{\partial z}\right) + \rho g_x, \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x V_y) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y V_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_y V_z) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \\ + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_{\text{эф}} \frac{\partial V_y}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_{\text{эф}} \frac{\partial V_y}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_{\text{эф}} \frac{\partial V_y}{\partial z}\right) + \rho g_y, \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x V_z) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y V_z) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_z V_z) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \\ + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_{\text{эф}} \frac{\partial V_z}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_{\text{эф}} \frac{\partial V_z}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_{\text{эф}} \frac{\partial V_z}{\partial z}\right) + \rho g_z, \end{aligned} \quad (2.8)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³;

V_x, V_y, V_z – компоненты вектора скорости в направлениях x, y и z соответственно, м/с;

x, y, z – глобальные декартовы координаты;

t – время, с;

P – давление, Н/м²;

$\mu_{\text{эф}}$ – эффективная вязкость, Па·с;

g_x, g_y, g_z – компоненты вектора ускорения свободного падения в направлениях x, y и z , соответственно, м/с².

Эффективная вязкость учитывает ламинарную вязкость μ (определяется свойствами расплава) и турбулентную вязкость μ_t (рассчитывается по модели турбулентности):

$$\mu_{\text{эф}} = \mu + \mu_t, \quad (2.9)$$

Системы уравнений (2.6-2.8) ее необходимо дополнить еще одним уравнением, в качестве которого используется уравнение неразрывности. Уравнение неразрывности, соответствующее закону сохранения массы, имеет вид [10, 11]:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_z) = 0, \quad (2.10)$$

Согласно теории подобия, необходимо осуществить приведение основных дифференциальных уравнений к безразмерному виду для определения чисел подобия, необходимых для построения модели и пересчета полученных результатов на оригинал [142, 143].

При записи в безразмерном виде уравнения (2.6-2.8) и (2.10) идентичны для любых гидродинамически подобных течений. Для приведения к безразмерному виду представим величины, входящие в уравнение (2.6), в относительных единицах, используя соответствующие для данной задачи размерные масштабы: $V_0, l_0, \tau_0, \rho_0, p_0, \mu_{\text{эф}0}$. В этом случае уравнение (2.4) примет вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\rho_0 V_0}{\tau_0} \cdot \frac{\rho}{\rho_0} \cdot \frac{\partial \frac{V_x}{V_0}}{\partial \frac{\tau}{\tau_0}} + \frac{\rho_0 V_0^2}{l_0} \cdot \frac{\rho}{\rho_0} \cdot \left(\frac{V_x}{V_0} \cdot \frac{\partial \frac{V_x}{V_0}}{\partial \frac{x}{l_0}} + \frac{V_y}{V_0} \cdot \frac{\partial \frac{V_x}{V_0}}{\partial \frac{y}{l_0}} + \frac{V_z}{V_0} \cdot \frac{\partial \frac{V_x}{V_0}}{\partial \frac{z}{l_0}} \right) = \\ & = \rho_0 \cdot \frac{\rho}{\rho_0} \cdot g - \frac{p_0}{l_0} \cdot \frac{\partial \frac{p}{p_0}}{\partial \frac{x}{l_0}} + \frac{\rho_0 \mu_{\text{эф}0} V_0}{l_0^2} \cdot \frac{\rho \mu_{\text{эф}}}{\rho_0 \mu_{\text{эф}0}} \cdot \left(\frac{\partial^2 \frac{V_x}{V_0}}{\partial \left(\frac{x}{l_0} \right)^2} + \frac{\partial^2 \frac{V_x}{V_0}}{\partial \left(\frac{y}{l_0} \right)^2} + \frac{\partial^2 \frac{V_x}{V_0}}{\partial \left(\frac{z}{l_0} \right)^2} \right). \end{aligned} \quad (2.6)$$

Разделив каждый член уравнения (2.6) на величину $\frac{\rho_0 V_0^2}{l_0}$ и безразмерную плотность $\frac{\rho}{\rho_0}$, получили:

$$\begin{aligned} & \frac{l_0}{\tau_0 V_0} \cdot \frac{\partial \frac{V_x}{\omega_0}}{\partial \frac{\tau}{\tau_0}} + \frac{V_x}{V_0} \cdot \frac{\partial \frac{V_x}{V_0}}{\partial \frac{x}{l_0}} + \frac{V_y}{V_0} \cdot \frac{\partial \frac{V_x}{V_0}}{\partial \frac{y}{l_0}} + \frac{V_z}{V_0} \cdot \frac{\partial \frac{V_x}{V_0}}{\partial \frac{z}{l_0}} = \frac{gl_0}{V_0^2} - \frac{p_0}{\rho_0 V_0^2} \cdot \frac{\rho_0}{\rho} \cdot \frac{\partial \frac{p}{p_0}}{\partial \frac{x}{l_0}} + \\ & + \frac{\mu_{эф0}}{V_0 l_0} \cdot \frac{\mu_{эф}}{\mu_{эф0}} \cdot \left(\frac{\partial^2 \frac{V_x}{V_0}}{\partial \left(\frac{x}{l_0} \right)^2} + \frac{\partial^2 \frac{V_x}{V_0}}{\partial \left(\frac{y}{l_0} \right)^2} + \frac{\partial^2 \frac{V_x}{V_0}}{\partial \left(\frac{z}{l_0} \right)^2} \right). \end{aligned} \quad (2.7)$$

Уравнения типа (2.7) одинаковы для гидродинамически подобных течений при равенстве для модели и образца комплексов:

$$\frac{l_0}{\tau_0 V_0}, \frac{gl_0}{V_0^2}, \frac{p_0}{\rho_0 V_0^2}, \frac{\mu_{эф0}}{V_0 l_0}. \quad (2.8)$$

В то же время, комплексы (2.8) являются критериями гомохронности (Ho), Фруда (Fr), Эйлера (Eu) и Рейнольдса (Re), т.е. подобие гидродинамических процессов в промежуточном ковше обеспечивается равенством указанных критериев:

$$Ho = \frac{V\tau}{l} = idem; Fr = \frac{V^2}{gl} = idem; Eu = \frac{p}{\rho V^2} = idem; Re = \frac{V \cdot l}{\mu_{эф}} = idem, \quad (2.9)$$

где l – линейный размер, м.

Для гомогенного изотермического течения, с учетом влияния сил инерции, гравитации, вязкости и давления важными, имеющими значения являются критерии Фруда, Рейнольдса и Эйлера. Эквивалентность критериев Фруда и Рейнольдса обеспечивает динамическое подобие между двумя геометрически подобными системами. Их сходство приводит к эквивалентности чисел Эйлера, что следует из уравнения 2.10 [139]:

$$1/Eu = f(Re, Fr) \quad (2.10)$$

Тем не менее, в уменьшенном масштабе моделирования (т.е. $\lambda < 1,0$), на водных моделях, где вода имитирует жидкую сталь, невозможно соблюдать одновременное равенство чисел Рейнольдса и Фруда. Это связано с тем, что кинематическая вязкость стали при 1873 К и воды при 298 К практически эквивалентны. Как правило, менее важные силы игнорируются и соответствующее безразмерное число не учитывается. Таким образом, течение считается с преобладанием влияния вязкости или сил инерции и гравитации [139].

Критерии динамического подобия для двух предельных случаев формулируются с помощью равенства числа Рейнольдса, т.е. $(Re)_{\text{модель}} = (Re)_{\text{оригинал}}$, и Фруда, т.е. $Fr_{\text{модель}} = Fr_{\text{оригинал}}$ соответственно. Эквивалентность чисел Рейнольдса означает, что скорость в соответствующем месте и времени изменяется пропорционально масштабу. В отличие от этого, эквивалентность чисел Фруда приводит к зависимости скорости пропорционально масштабу в степени 0,5 [139].

Размер металлургических агрегатов является значительным, что приводит к высокой интенсивности перемешивания. Поскольку кинематической вязкости стали мала ($\sim 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$), число Рейнольдса, связанное с таким течением часто значительное ($> 10^4$). В отличие от этого, число Фруда является меньше на два или три порядка меньше. Поэтому можно предположить, что по отношению к инерционным силам, вклад сил вязкости мал и, следовательно, может быть игнорирован. В уменьшенном масштабе, при исследованиях на водных моделях, течение часто принимается с доминирующей ролью инертной и гравитационной сил [139].

В качестве имитирующей жидкости в физической модели используется вода, при этом обеспечивается визуализация протекающих процессов. Свойства, характеризующие течение, воды близки свойствам жидкой стали (таблица 2.1) при температуре металлургических процессов [43, 144].

Таблица 2.1 – Сравнение физических свойств воды при температуре 293 К и жидкой стали при температуре 1873 К

Параметр	Вода (293 К)	Жидкая сталь (1873 К)
Динамическая вязкость, μ , кг/(м·с)	0,001	0,0064
Плотность, ρ , кг/м ³	998	7014-7080
Кинематическая вязкость, $\nu = \mu / \rho$ м ² /с	$1 \cdot 10^{-6}$	$0,904 \cdot 10^{-6}$ - $0,913 \cdot 10^{-6}$
Поверхностное натяжение, σ , Н/м	$7,3 \cdot 10^{-3}$	1,6-1,9

Из таблицы 2.1 следует, что кинематические вязкости воды при комнатной температуре и жидкой стали близки по значению, что позволяет на водных моделях эффективно исследовать явления движения потоков, перемешивания, траекторию движения неметаллических включений и т.д. [145].

Критерий гомохронности характеризует изменение поля скоростей во времени, Фруда – соотношение сил тяжести и инерции в потоке, Эйлера – сил давления и инерции, а критерий Рейнольдса является мерой соотношения сил инерции и молекулярного трения и, следовательно, характеризует гидродинамический режим течения потока.

По данным работы [96] для процессов гидродинамики потоков жидкого металла критерий Эйлера является неопределяющим, а значения критерия Рейнольдса превышают 2320, что соответствует области автомодельности и свидетельствует о необязательности соблюдения в таких случаях условия $Re=idem$.

С использованием условия равенства чисел Фруда определили масштаб скоростей M_ω :

$$M_\omega = \frac{\omega}{\omega'} = \sqrt{\frac{gl}{gl'}} = \sqrt{\frac{l}{l'}} = \sqrt{M_l} \quad (2.11)$$

Масштаб расходов M_Q получили из условия неразрывности потока $Q = \omega \cdot S$:

$$M_Q = \frac{Q}{Q'} = \frac{\omega S}{\omega' S'} = M_\omega \cdot M_l^2 = M_l^2 \sqrt{M_l}, \quad (2.12)$$

где Q – объемное количество жидкого металла, м³/ч;

S – площадь поперечного сечения потока, м².

Объемное количество жидкого металла, поступающего в промежуточный ковш $Q_{\text{вх}}$ и кристаллизатор $Q_{\text{вых}}$, определяется из выражения:

$$Q_{\text{вх}} = Q_{\text{вых}} = F \cdot V \cdot 60, \quad (2.14)$$

где F – площадь сечения заготовки, м^2 ;

V – скорость разливки, м/мин .

Масштаб времени M_τ определили из условия равенства критерия гомохронности:

$$M_\tau = \frac{\tau}{\tau'} = \frac{l\omega'}{l'\omega} = \frac{M_l}{M_\omega} = \frac{M_l}{\sqrt{M_1}} = \sqrt{M_1}. \quad (2.13)$$

Практическое осуществление моделирования разливки стали при одновременном соблюдении идентичности критериев (чисел подобия) Фруда и Рейнольдса затруднено, т.к. требует для соблюдения идентичности чисел Рейнольдса подогрева воды до $60-70^\circ\text{C}$. Также известно, что одновременное соблюдение критериев Фруда и Рейнольдса возможно только при масштабе физической модели 1:1 [145]. Так как разливка осуществляется в пределах автомодельности относительно Re , то соблюдение идентичности в полной мере не требуется.

В работе [146] доказано, что в условиях подачи жидкого металла из одной емкости в другую под уровень соблюдения идентичности чисел Боде для модели и оригинала становится не обязательным условием из-за малости по сравнению с другими числами подобия. Это обстоятельство позволяет в первую очередь принимать линейный масштаб моделирования, исходя из конструктивных соображений. С другой стороны появляется возможность проведения моделирования в широком диапазоне линейных масштабов моделирования от 1:1 до 1:8 [132].

2.1.2 Разработка лабораторного комплекса для исследования гидродинамических процессов в промежуточном ковше МНЛЗ

Исследование гидродинамических процессов проводили для условий 28-т промежуточного ковша МНЛЗ №1 электросталеплавильного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК», внутренний объем которого представляет единую ванну (рисунки 2.2, 2.3). В промежуточный ковш металл поступает из сталеразливочного ковша через защитную трубу. Затем с использованием погружного стакана металл поступает в кристаллизатор, где происходит формирование заготовки сечением 300×360 мм, при этом скорость разливки составляет 0,4-0,8 м/мин.

Выполненный анализ подобия позволил определить конструктивные и технологические характеристики модели (таблица 2.2), в соответствии с которыми реализован проект экспериментального комплекса [147, 148] для исследования гидродинамических процессов в промежуточном ковше в масштабе 1:2,5 (рисунки 2.4, 2.5).

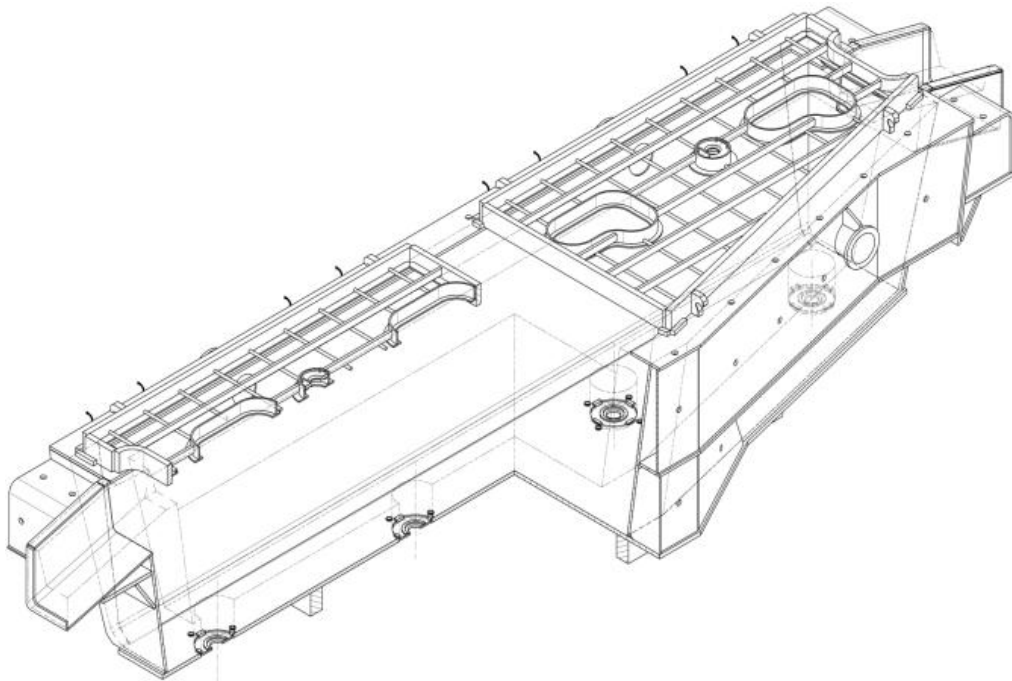


Рисунок 2.2 – Конструкция промежуточного ковша
МНЛЗ №1 ЭСПЦ АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

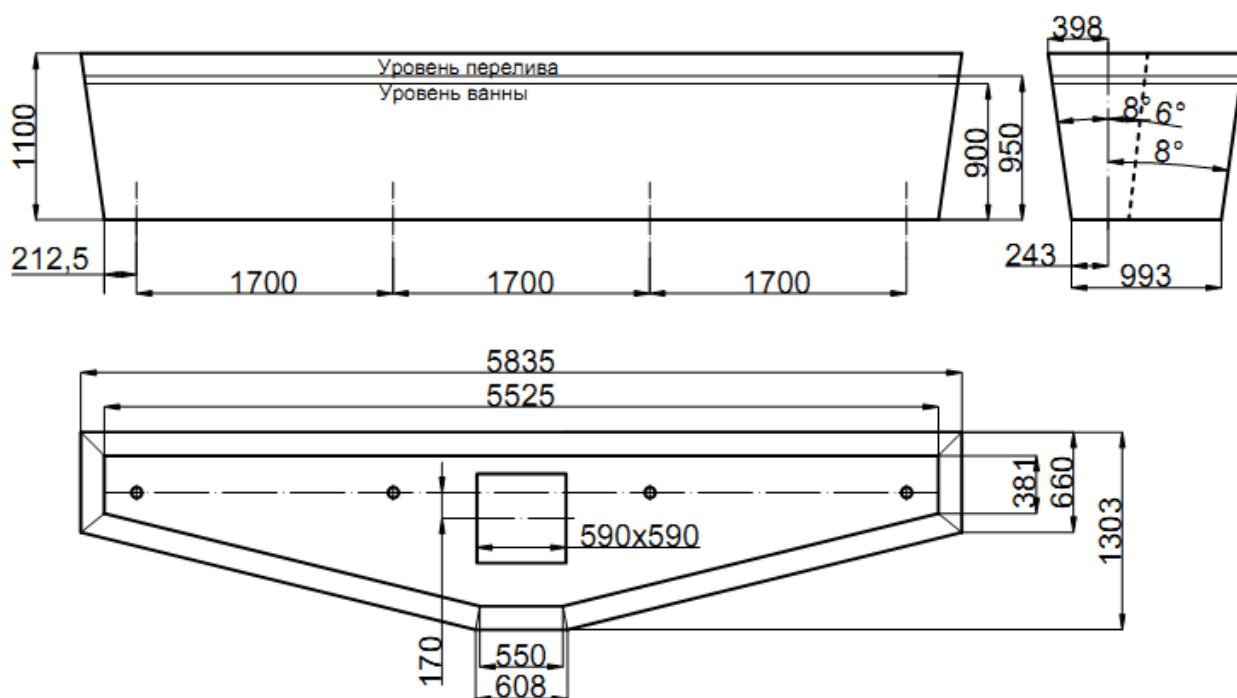
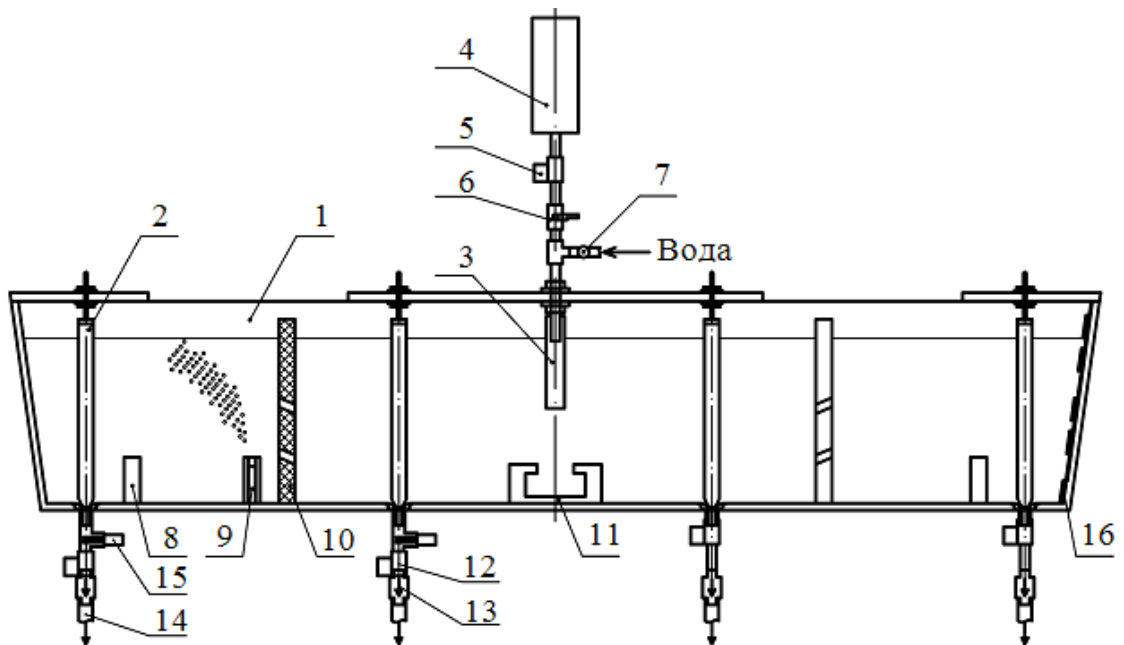


Рисунок 2.3 – Чертеж промежуточного ковша МНЛЗ №1 ЭСПЦ
АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Таблица 2.2 – Конструктивные и технологические параметры объекта и модели промежуточного ковша

Параметр	Промежуточный ковш	
	Объект	Модель
Длина донной части, мм	5525	2210
Длина верхней кромки, мм	5835	2334
Ширина донной части, мм	1148,41	459,364
Ширина верхней кромки, мм	1302,6	521,04
Рабочий уровень, мм	900	360
Уровень перелива, мм	950	380
Расстояние между осями стопоров, мм	1700	680
Внутренний диаметр защитной трубы, мм	65	26
Скорость подачи жидкости в объем промежуточного ковша, м ³ /мин	0,043-0,086	0,004-0,008
Количество ручьев	4	
Масштабы:		
линейный M_l	2,5	
скоростной M_ω	1,58	
расходный M_Q	9,88	
временной M_τ	1,58	



- 1 – модель промежуточного ковша; 2 – стопор; 3 – труба подвода моделирующей жидкости; 4 – резервуар для красителя (солевого раствора);
 5 – электромагнитный клапан (нормально-закрытый) для подачи индикатора;
 6 – кран; 7 – вентиль, регулирующий расход моделирующей жидкости;
 8-11 – модели рафинирующих устройств; 12 – электромагнитный клапан (нормально-открытый) для отвода моделирующей жидкости; 13 – расходомеры;
 14 – линии отвода моделирующей жидкости; 15 – датчики солемера;
 16 – датчики уровня моделирующей жидкости

Рисунок 2.4 – Схема экспериментального комплекса для исследования гидродинамических процессов в промежуточном ковше

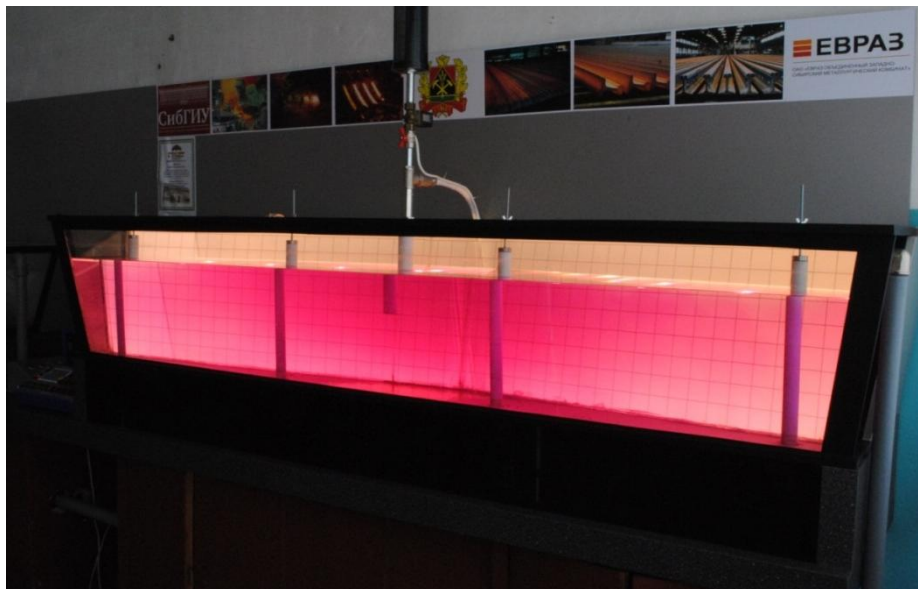
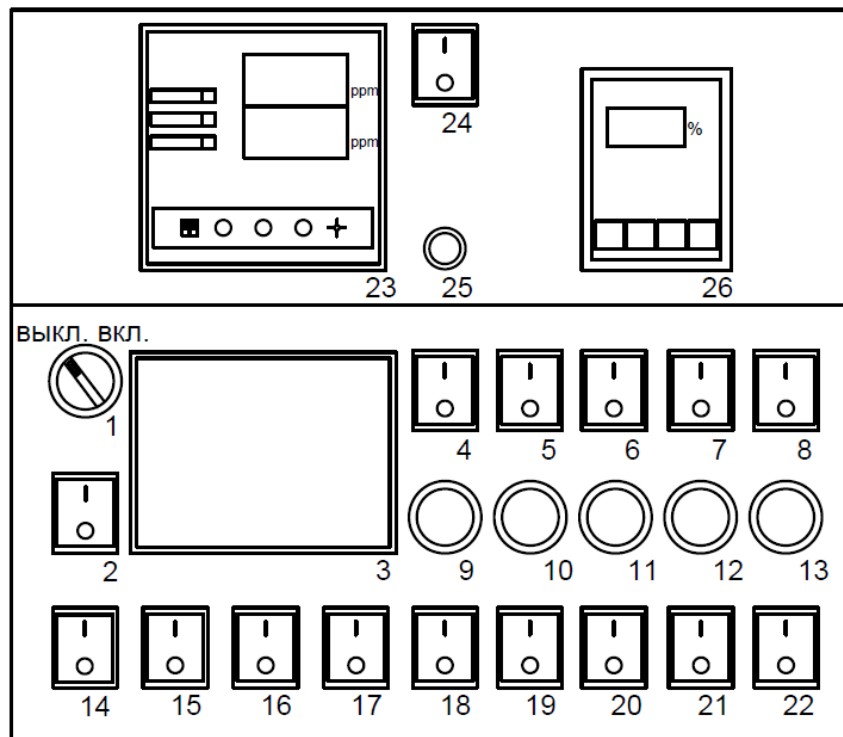


Рисунок 2.5 – Экспериментальный комплекс для исследования гидродинамических процессов в промежуточном ковше

Основным элементом разработанного экспериментального комплекса (рисунок 2.4) является модель промежуточного ковша, выполненная в виде прозрачной емкости из органического стекла. В качестве моделирующей жидкости используется вода, физические свойства которой (таблица 2.1) гидродинамически подобны свойствам жидкой стали при температурах разливки. Управление установкой осуществляется с пульта, схема которого представлена на рисунке 2.6.



1 – переключатель электропитания; 2 – кнопка включения подсветки;
 3 – дисплей расходомеров; 4 – кнопка передачи сигнала от расходомера (измеряющего расход воды на входе в промежуточный ковш) на дисплей;
 5, 6, 7, 8 – кнопки передачи сигнала от расходомеров (измеряющих расход воды на выходе из разливочных стаканов) на дисплей; 9 – кнопка ввода индикатора (красителя/солевого раствора); 10, 11, 12, 13 – кнопки управления положением стопоров; 14, 15, 16, 17 – кнопки подачи сигнала на нормально-открытые электромагнитные клапаны; 18 – кнопка включения компрессора; 19, 20, 21, 22 – кнопки переключения реверса электродвигателей для подъема / опускания стопоров; 23 – солемер PS202; 24 – кнопка вкл./выкл. питания солемера; 25 – сигнальная лампа подачи индикатора; 26 – дисплей отображения уровня воды в модели промежуточного ковша

Рисунок 2.6 – Схема пульта управления экспериментального комплекса

Перед подачей воды из водопроводной сети через подводящую трубу 3 в прозрачную модель промежуточного ковша 1, осуществляется подача сигнала на закрытие электромагнитных клапанов 12. Регулирование расхода воды на входе в модель производится вентилем 7. После наполнения модели до рабочего уровня (360 мм) отвод воды по линиям отвода 14 осуществляется путем прекращения подачи сигнала на электромагнитные клапаны 12. Расход воды на выходе регулируется положением стопоров 2. Расходомерами 13 производится измерение расхода воды. Визуализацию потоков жидкости производили вводом в струю воды красителя из резервуара 4. Ввод красителя осуществляется при поддержании постоянного уровня воды в модели подачей сигнала на открытие электромагнитного клапана 5. В качестве красителя используется водный раствор перманганата калия концентрацией 3 г/л. Распределение потоков жидкости осуществляется путем установки порогов 8, полнопрофильных перегородок 10 с направляющими отверстиями, струегасителей 11 и пористых блоков 9 с возможностью продувки воздухом. При использовании пористых блоков подвод воздуха осуществляли с помощью компрессора с возможностью регулирования расхода. Для измерения концентрации соли в центральный и периферийный разливочный стакан установлены датчики солемера 15. Уровень моделирующей жидкости определяется датчиками уровнемера 16.

Для определения скоростей потоков моделирующей жидкости и местоположения на заднюю стенку модели нанесена координатная сетка с размером клетки 5 см. Перемещение границы подкрашенной жидкости на фоне координатной сетки регистрируется цифровой видеокамерой Panasonic SDR-H41. Для качественной видеофиксации гидродинамических процессов задняя стенка модели подсвечивается лампами накаливания. Информацию о направлении и скорости движения потоков жидкости в различных областях промежуточного ковша, минимальном времени пребывания металла, объеме застойных зон и площади активного контакта расплава с покровным шлаком при различных технологических параметрах процесса и конструкции промежуточного ковша получали путем обработки видеоматериала с получением кинограмм. Оценка

степени гомогенизации жидкости и уточнение минимального времени пребывания металла в объеме промежуточного ковша осуществляется кондуктометрическим методом [149]. В качестве индикатора используется солевой раствор. Измерение электрической проводимости и содержания NaCl в воде производится солемером PS202, датчики которого установлены в разливочных стаканах модели промежуточного ковша. При этом показания солемера непрерывно регистрируются.

Для условий моделирования произведен пересчет расхода жидкого металла на расход воды при различных скоростях разливки (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Объемный расход (Q) жидкой стали и воды, м³/мин

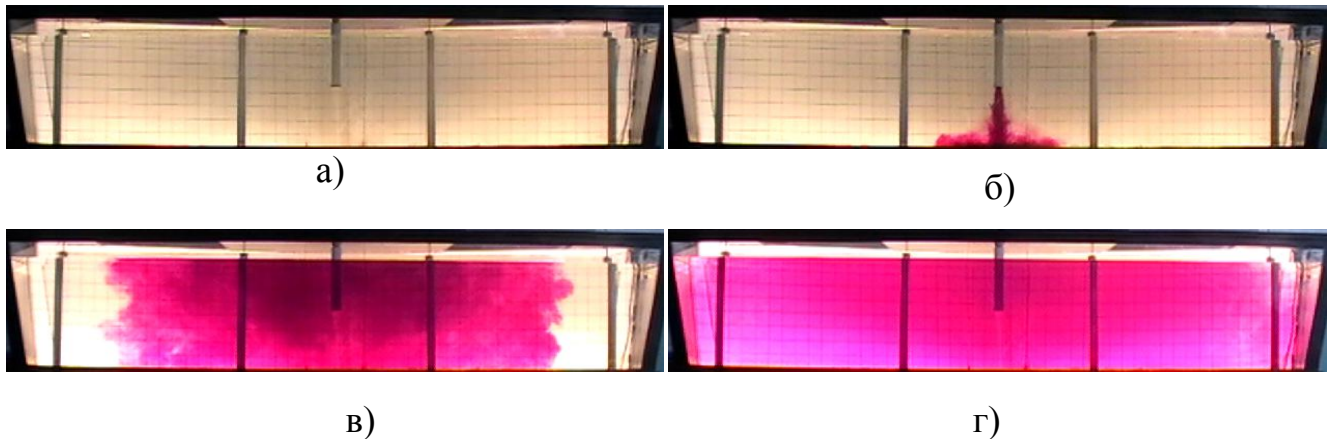
Скорость разливки металла, м/мин	Жидкая сталь, м ³ /мин	Вода, м ³ /мин
0,4	0,043	0,0044
0,42	0,045	0,0046
0,44	0,048	0,0048
0,46	0,050	0,0050
0,48	0,052	0,0052
0,5	0,054	0,0055
0,52	0,056	0,0057
0,54	0,058	0,0059
0,56	0,060	0,0061
0,58	0,063	0,0063
0,6	0,065	0,0066
0,62	0,067	0,0068
0,64	0,069	0,0070
0,66	0,071	0,0072
0,68	0,073	0,0074
0,7	0,076	0,0077
0,72	0,078	0,0079
0,74	0,080	0,0081
0,76	0,082	0,0083
0,78	0,084	0,0085
0,8	0,086	0,0087

Распределение потоков моделирующей жидкости производится с использованием реализованных с помощью технологии трехмерной (объемной) печати моделей устройств – порогов, струегасителей и полнопрофильных перегородок различных конфигураций.

Исследование гидродинамических процессов проводили для условий получения блюмовой заготовки со скоростью 0,7 м/мин с подачей металла в промежуточный ковш через защитную трубу при различных вариантах конфигурации внутреннего объема промежуточного ковша:

- 1) с единой ванной (базовый вариант);
- 2) с установкой порогов;
- 3) с установкой струегасителей, различных конфигураций;
- 4) с установкой полнопрофильных перегородок;

Каждый вариант исследований производили в несколько этапов. Основные этапы при использовании метода визуализации потоков представлены на рисунке 2.7.



- а – наполнение модели промежуточного ковша до рабочего уровня и его поддержание за счет обеспечения равенства расхода моделирующей жидкости поступающей и отводимой из модели промежуточного ковша;
- б – ввод красителя при установившемся течении моделирующей жидкости;
- в, г – видеосъемка распределения подкрашенной жидкости в объеме модели промежуточного ковша с непрерывной регистрацией концентрации соли кондуктометром PS202

Рисунок 2.7 – Основные этапы моделирования гидродинамических процессов в промежуточном ковше методом визуализации потоков

Перемещение границы подкрашенной жидкости на фоне координатной сетки регистрировали цифровой видеокамерой. Видеосъемку начинали до ввода красителя и продолжали до тех пор, пока краситель не растворялся по всему объему ковша. Обработку видеоматериалов и получение кинограмм производили на персональном компьютере с использованием видеоредактора. По полученным кинограммам определяли время перемещения локальных объемов подкрашенной жидкости от момента ввода красителя до момента поступления первых порций подкрашенной жидкости в разливочный стакан, строили схемы циркуляции и оценивали объем застойных зон.

Промежуток времени от начала поступления красителя в промежуточный ковш до достижения потоком подкрашенной жидкости разливочного стакана является минимальным временем пребывания жидкости в объеме промежуточного ковша.

2.2 Программная реализация математической модели течения металлического расплава в промежуточном ковше

Применение в качестве альтернативного варианта методов численного моделирования в сочетании с физическим, является достаточно эффективным при исследовании гидродинамических и тепломассообменных процессов в промежуточном ковше [150-152].

Реальная геометрия промышленных агрегатов, требует возможности применения адаптивных сеток и независимости свойств расчетного метода с выбранной системой координат [153, 154]. С этой точки зрения наибольшей гибкостью обладает метод конечных элементов [155-158].

Интенсивное развитие компьютерных технологий в последние два десятилетия способствовало активному развитию программных комплексов конечно-элементного анализа и их внедрению в практику научной деятельности для организации численных экспериментов и получения новой информации о процессах, происходящих в высокотемпературных зонах металлургических

агрегатов. Использование современных методов математического моделирования позволяет получить общую картину процессов гидродинамики, массо- и теплопереноса в объеме металлургических агрегатов, визуализировать результаты вычислений в виде линий, векторов, полей скоростей, давлений или температур [43] для совершенствования различных технологических процессов [139].

Для исследования гидродинамических процессов при непрерывной разливке стали в условиях электросталеплавильного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК» использовалась трехмерная, турбулентная математическая модель с однофазным представлением металлического расплава с применением программного комплекса, основанного на конечно-объемном методе решения уравнений гидродинамики, согласно предложенной схеме (рисунок 2.8).

Построение математической модели включает следующие стадии [43]:

1 Препроцессорная стадия, включающая операции по созданию геометрической модели рассматриваемой расчетной области; заданию физических свойств среды (материалов) в расчетной области; генерации конечно-элементной модели (дискретизация) рассматриваемой расчетной области, т.е. созданию сетки конечных элементов; приложению к модели граничных условий: внешних воздействий (температур, тепловых потоков, сил и т.д.) и закреплений на границах области;

2 Процессорная стадия, заключающаяся в выполнении следующих операций: получение на основе функций конечных элементов кусочно-непрерывной функции, определенной на всей расчетной области, и построение глобальной матрицы теплопроводности; составление системы алгебраических уравнений путем минимизации некоторой величины, связанной с физической постановкой задачи, и решение этой системы относительно узловых значений;

3 Постпроцессорная стадия: вывод результатов расчета в графической и текстовой формах (поля скоростей, деформаций и напряжений, потоки тепла, температурные градиенты и др.); анализ полученных результатов.



Рисунок 2.8 – Этапы построения математической модели гидродинамических процессов в промежуточном ковше

При математическом моделировании приняты следующие допущения:

- стальной расплав рассматривается как ньютоновская жидкость, несжимаемая и неразрывная [36, 159];
- струя расплава, поступающего из сталеразливочного ковша в промежуточный, идеально организована [160];

- уровень расплава в промежуточном ковше постоянный и соответствует рабочему уровню металлической ванны [161];
- зеркало металла в промежуточном ковше неподвижно и покрыто слоем шлакового расплава [160];
- объемный расход расплава на выходе из промежуточного ковша зависит только от объемного расхода на входе и от площади поперечного сечения входного и выходных отверстий (рассчитывается из условия сохранения постоянного количества расплава в промежуточном ковше);
- внешние силовые воздействия на расплав (инжекция воздуха, электромагнитное поле и др.) отсутствуют;
- в модели учитывается турбулентный характер движения расплава;
- промежуточный ковш имеет вертикальную плоскость симметрии.

В качестве исходных данных для построения геометрической модели расчетной области использовали геометрические размеры внутреннего объема промежуточного ковша МНЛЗ №1 электросталеплавильного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

В качестве расчетной области, в связи с наличием вертикальной плоскости симметрии, принята половина части внутреннего объема промежуточного ковша, занимаемая жидким расплавом. Для построения конечно-элементной модели расчетная область была разделена на 350000 конечных объёмов (расчетных ячеек) тетраэдральной формы, рисунок 2.9. При этом для повышения точности расчетов, сетку создавали неравномерной, таким образом, чтобы в областях с большим градиентом скорости (области разливочных стаканов, стопоров и защитной трубы), количество ячеек увеличено, а их размер уменьшен.

Математическая модель позволяет учесть такие свойства жидкой стали как плотность, вязкость, теплопроводность и теплоемкость. При этом теплоемкость, теплопроводность, плотность и вязкость задаются постоянными, равными 840 Дж/(кг·К) [43]; 27 Вт/(м·К) [43]; 7030 кг/м³ [139, 144]; 0,0064 кг/(м·с) [145] соответственно.

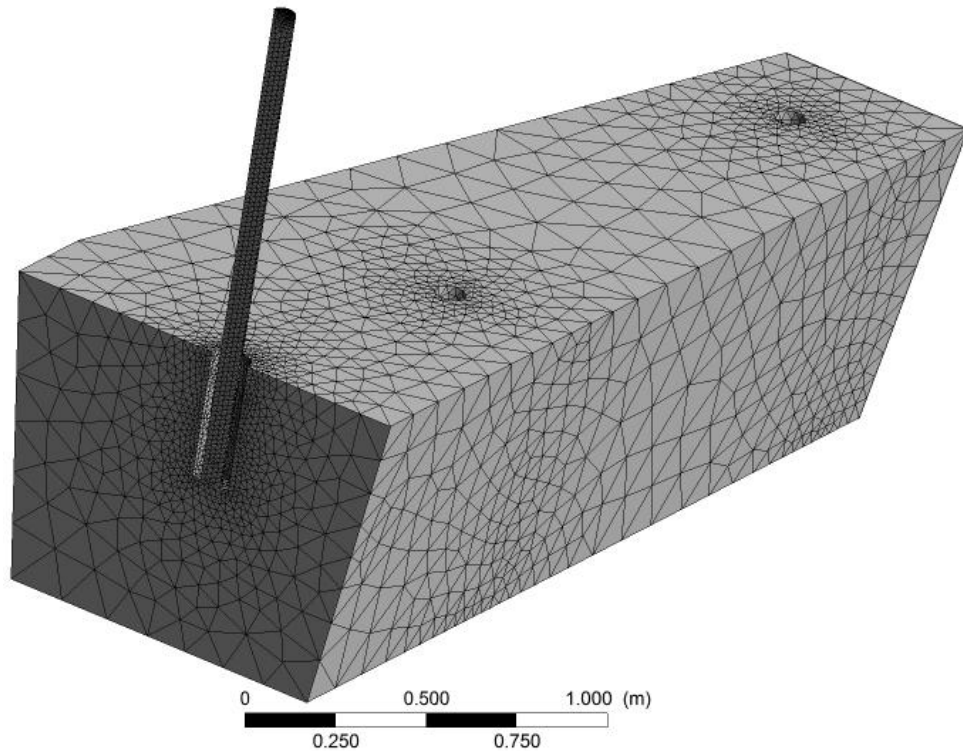


Рисунок 2.9 – Вид конечно-элементной модели расчетной области
четырёхручьевого промежуточного ковша

Поскольку естественная конвекция оказывает влияние на движение расплава [162] и в неізотермическом процессе поток жидкости и движение неметаллических включений значительно отличаются от изотермического процесса [163-166] в данной математической модели было принято условие неізотермического движения расплава.

Связь теплопереноса и движения жидкости отражает закон сохранения энергии, представляемый в виде термического транспортного уравнения [43, 145]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x T C_p) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y T C_p) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_z T C_p) = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{\text{эфф}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{\text{эфф}} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{\text{эфф}} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_v, \end{aligned} \quad (4.1)$$

где T – температура расплава, К;

C_p – удельная теплоемкость расплава, Дж/(кг·К);

$k_{\text{эфф}}$ – эффективная теплопроводность расплава, Вт/(м·К), определяется моделью турбулентности;

Q_v – объемные источник тепла, отсутствии дополнительного нагрева $Q_v=0$.

Переходя от записи уравнений в частных производных к матричной форме, формируется система уравнений, решением которых являются значения компонентов вектора скорости, давления, температуры в пределах рассматриваемой расчетной области.

Температура жидкой стали принята на основании регламента, установленного в технологической инструкции по непрерывной разливке на МНЛЗ №1 электросталеплавильного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК» для стали марки Э76ХФ, и составляет 1513 °С (1786 К), скорость разливки 0,7 м/мин, сечение заготовки 300×360 мм.

В качестве граничных условий и нагрузок на входе заданы значения массового расхода (Q , т/мин) и температуры расплава (T , К), а также значение гидравлического диаметра, равное внутреннему диаметру защитной трубы (65 мм) и интенсивность турбулентности [167]. Для стенок и поверхности металла – значения тепловых потерь на соответствующих поверхностях (q_i , кВт/м²).

На выходе задано условие свободного истечения «outflow» [168-172]. Данное условие, как отмечается в работе [173], позволяет получить высокую степень корреляции с результатами эксперимента, в отличие от условия задания на выходе давления (атмосферного) «Pressure outlet» [174-176]. Для всех стенок промковша задано условие «непроницаемая стенка, с прилипанием» (отсутствием скольжения) «no slip» [168, 169, 171, 172, 174, 177-179]. При этом условии соблюдается равенство нулю всех компонентов вектора скорости. Поверхность расплава задана как свободная поверхность с нулевым касательным (сдвиговым) напряжением «zero shear stress» [168, 169, 173, 177, 180, 181]. Для поверхности симметрии задано условие «symmetry» [172, 176, 179, 182].

Также моделью учитывается влияние гравитации, направление вектора ускорения свободного падения и его значение $g=-9,81$ м/с².

Схематичное изображение заданных граничных условий и нагрузок представлено на рисунке 2.10.

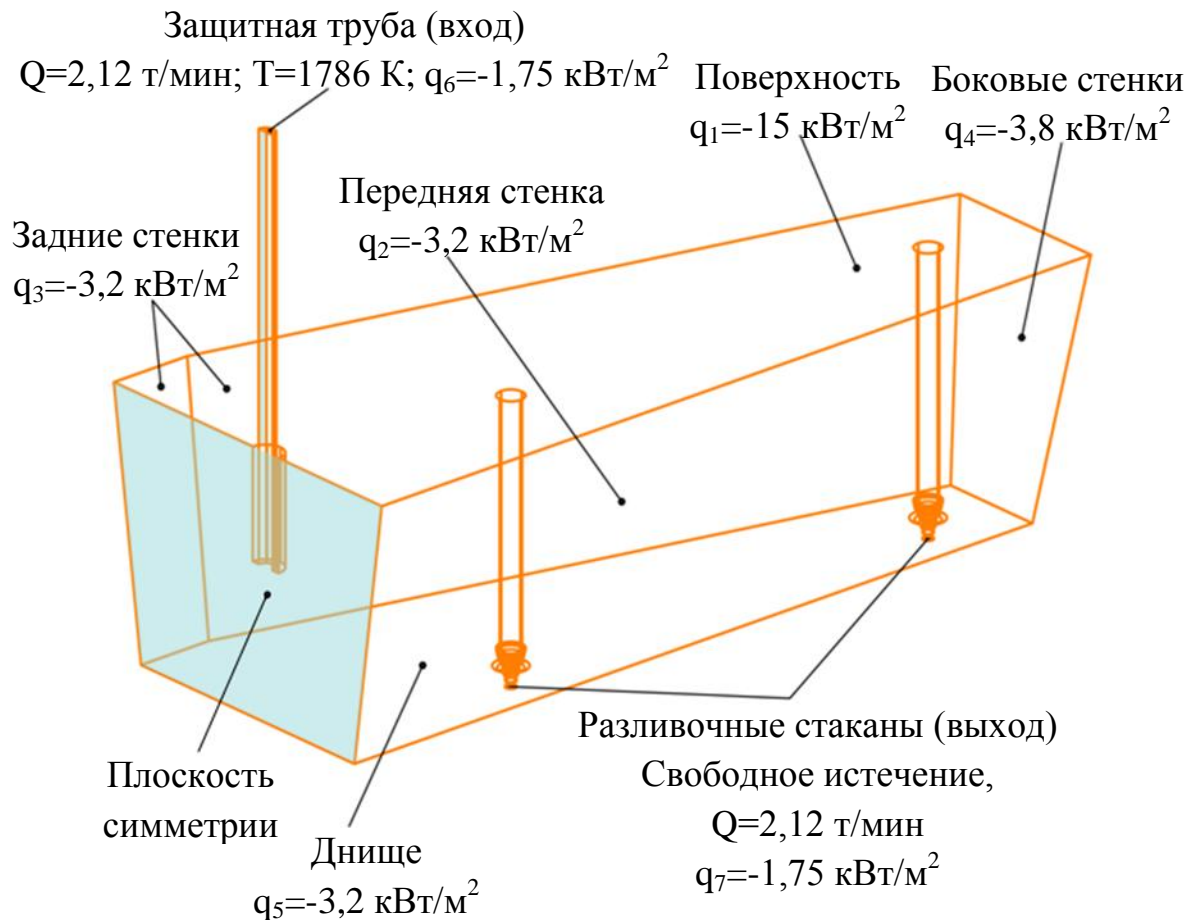


Рисунок 2.10 – Граничные условия и нагрузки

Для описания турбулентности использована RNG k - ϵ модель [141], наиболее распространенная и хорошо зарекомендовавшая себя при расчете гидродинамических процессов [139, 145]. Турбулентная кинетическая энергия (k , $\text{м}^2/\text{с}^2$) и скорость её диссипации (ϵ , $\text{м}^2/\text{с}^3$) на входе в защитную трубу задавались по следующим выражениям [173]:

$$k = 0,01 \cdot V_{\text{вх}}^2 ,$$

$$\epsilon = \frac{2 \cdot V_{\text{вх}}^{1,5}}{D_{\text{вх}}} ,$$

где $V_{\text{вх}}$ – скорость расплава на входе в защитную трубу, $\text{м}/\text{с}$;

$D_{\text{вх}}$ – диаметр защитной трубы, м .

В качестве алгоритма решателя выбран PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operator), который является модификацией алгоритма SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) и используется для задач моделирования

движения потоков металлического расплава в нестационарной постановке [179, 180]. Алгоритм PISO является раздельным (последовательным) «segregated», в нем уравнения переноса решаются раздельно, т.е. сначала производится раздельное решение уравнений количества движения в проекциях на оси принятой системы координат, затем производится коррекция давления и скорости, затем – решение уравнений переноса для скалярных величин (кинетической энергии турбулентности и т.п.), после чего осуществляется проверка сходимости [19, 36].

Большое влияние на точность расчета оказывает выбор порядка дискретизации исходных уравнений. В основном, исследователями в области моделирования гидродинамических процессов используется схему дискретизации второго порядка точности [169, 174, 182] или локально третьего порядка точности «QUICK» [168, 182] и реже схема дискретизации первого порядка точности [173, 177]. Для получения корректных решений, необходимо использовать дискретизацию второго и выше порядков точности.

Для повышения устойчивости решения и наложения ограничений на изменение переменной в течение итерации используются коэффициенты релаксации и невязки при решении соответствующих уравнений. Уменьшение значений коэффициентов релаксации улучшает сходимость, но значительно увеличивают время счета и наоборот [183, 184]. Для моделирования гидродинамики металлического расплава исследователи обычно задают следующие значения коэффициентов релаксации: 0,3; 0,7; 0,5-0,8; и 1,0 для давления, импульса, турбулентной кинетической энергии, её диссипации и теплопроводности, плотности, массовых сил, турбулентной вязкости соответственно [171, 173, 177].

Известно, что движение вязкой несжимаемой жидкости в трехмерном пространстве, в поле массовых сил описывается системой уравнений Навье-Стокса, расчет которой осуществляется решателем программы численным методом. При этом дифференциальные уравнения в области произвольного узла сетки заменяются алгебраическими уравнениями-аналогами, описывающим изменение переменной между несколькими соседними точками. Решение аналога

осуществляется итерационным методом. После каждой итерации решателем программы вычисляются некоторые значения переменных. Они подставляются в исходные уравнения, выраженные в виде $f(p, T, \rho, x, y, z, \dots) = 0$. Поскольку решение является приближенным (т.к. решается алгебраический аналог, а не дифференциальное уравнение), то при подстановке результата расчета получается, что $f(p, T, \rho, x, y, z, \dots) = R$. Величина R называется невязкой [183, 184]. Исходя из анализа работ [173, 182, 174, 172] невязки для решения задач моделирования гидродинамических процессов находятся в пределах 10^{-3} - 10^{-5} .

На основании выполненного анализа, в данном исследовании, для решения задач задан сдвоенный алгоритм установления «Pressure Based Coupled», со схемой дискретизации для всех рассчитываемых параметров «QUICK». Коэффициенты релаксации для уравнений давления, импульса, турбулентной кинетической энергии, и её диссипации заданы равными значениям 0,3; 0,7; 0,5, для уравнений плотности, массовых сил, турбулентной вязкости и теплопроводности коэффициенты релаксации заданы равными значению 1,0. Для всех решаемых уравнений (неразрывности, скорости, турбулентной кинетической энергии, и её диссипации и др.) заданы значения невязок менее 10^{-4} . При проведении исследований расчет процесса по времени выполнен с шагом 0,01 с при постепенном увеличении до 0,25 с.

2.3 Методика оценки эффективности гидродинамических элементов в промежуточном ковше

Оценку эффективности конфигурации промежуточного ковша для обеспечения гомогенизации металла по химическому составу и температуре и рафинирования металлического расплава от неметаллических включений, возможно, выполнить при использовании метода исследования распределения времени пребывания жидкости в агрегате. Гидродинамические процессы в промежуточном ковше, как и в проточном реакторе непрерывного действия характеризуются непрерывной циркуляцией поступающего потока жидкости

характеризующегося двумя предельными моделями - идеальным вытеснением и идеальным смешением, а отклонение вызывается либо рециркуляцией, либо застойными областями, в которых циркуляция металлического расплава практически отсутствует [185]. Модель идеального вытеснения (рисунок 2.11) характеризуется тем, что поток движется упорядочено, без смешения по оси движения. При этом возможно боковое перемешивание жидкости без смешивания или диффузии вдоль пути потока.

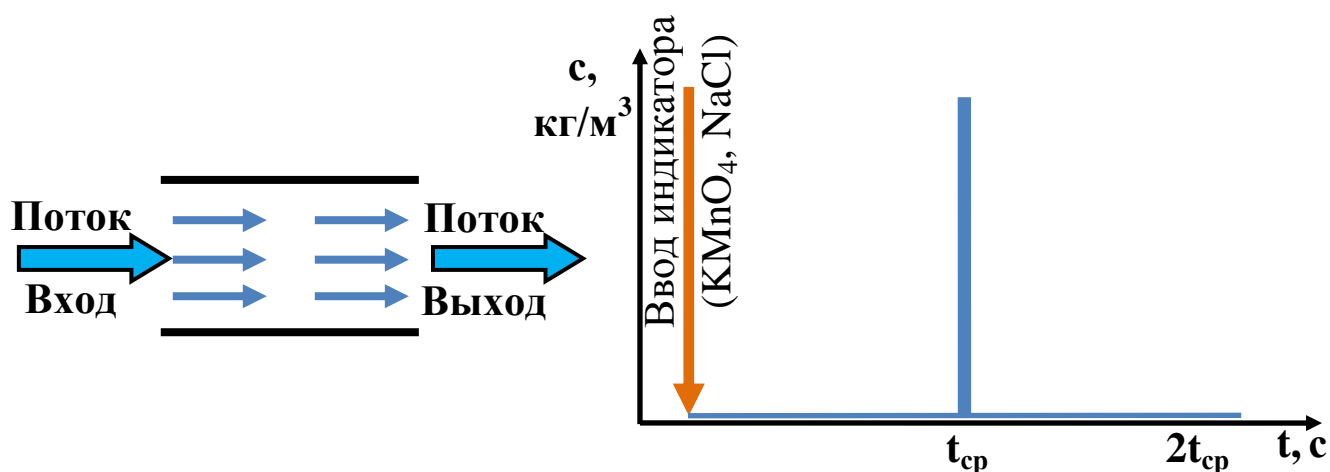


Рисунок 2.11 – Модель идеального вытеснения

Модель идеального смешения (рисунок 2.12) характеризуется равномерным перемешиванием по всему объему и поступающий поток, проходя через реактор, на выходе имеет тот же состав что и жидкость внутри реактора.

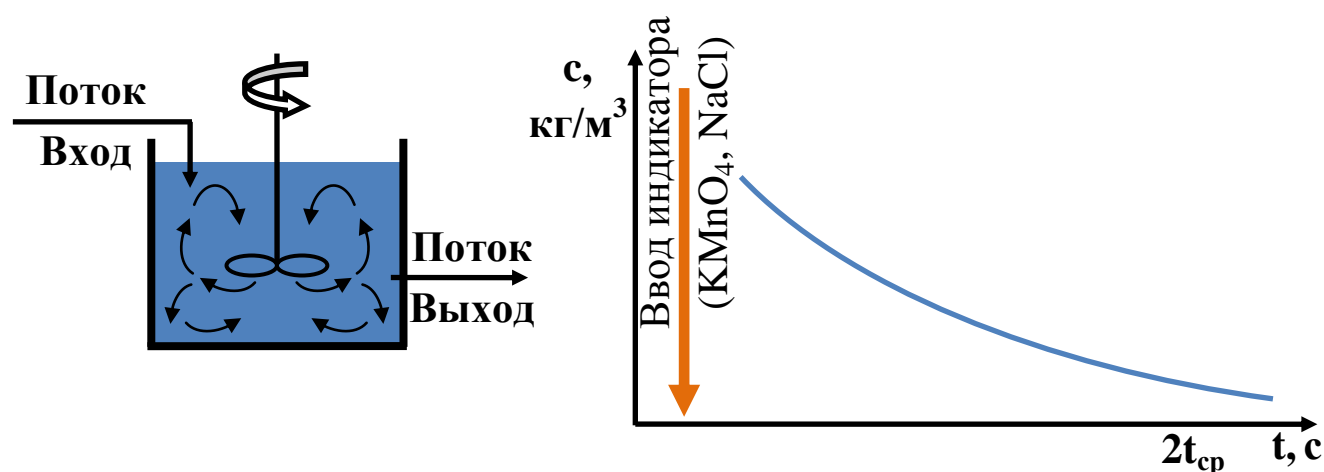


Рисунок 2.12 – Модель идеального смешения

Поскольку структура потоков жидкости в промежуточном ковше не является идеальной, для того чтобы его охарактеризовать, можно условно разделить весь объем на три области: идеального вытеснения, идеального смешения и застойные зоны. Для этого при физическом моделировании использован метод импульсного ввода индикатора и отслеживания его концентрации на выходе из разливочных стаканов. В качестве индикатора использован солевой раствор NaCl. Фиксирование изменений значений концентрации индикатора на выходе из разливочных стаканов позволяет построить кривую распределения времени пребывания индикатора в промежуточном ковше, анализ которой позволяет выполнить количественную оценку объемных долей областей промежуточного ковша.

Для построения кривой распределения времени пребывания индикатора в промежуточном ковше (рисунок 2.13) предварительно необходимо рассчитать среднее теоретическое время пребывания жидкости в промежуточном ковше (время опустошения промежуточного ковша) по выражению:

$$t_{cp} = \frac{V}{Q} ; \quad (2.15)$$

где V – внутренний объем промежуточного ковша, м^3 ;

Q – расход жидкого металла (моделирующей жидкости), $\text{м}^3/\text{с}$.

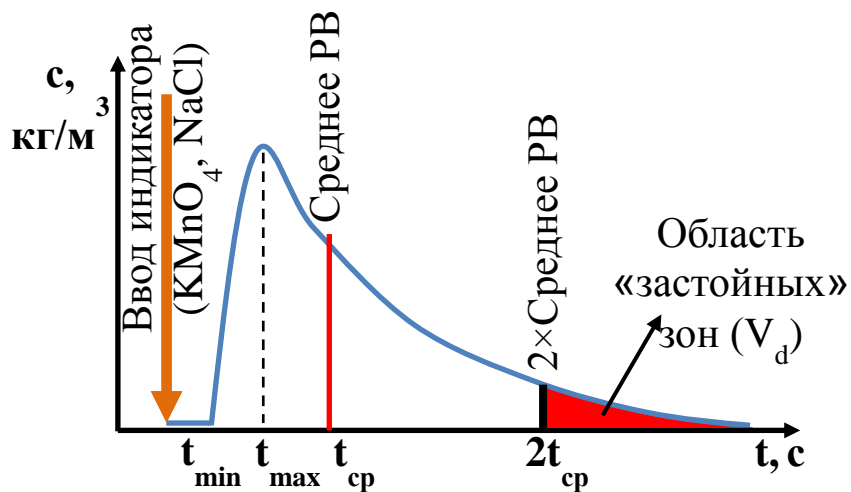


Рисунок 2.13 – Кривая распределения времени пребывания жидкости в промежуточном ковше базового варианта конструкции

Поскольку масштабы времени оригинала и модели различны целесообразно преобразовать величину времени к безразмерному значению приняв за единицу масштаба времени среднее теоретическое время пребывания жидкости в промежуточном ковше (рисунок 2.14).

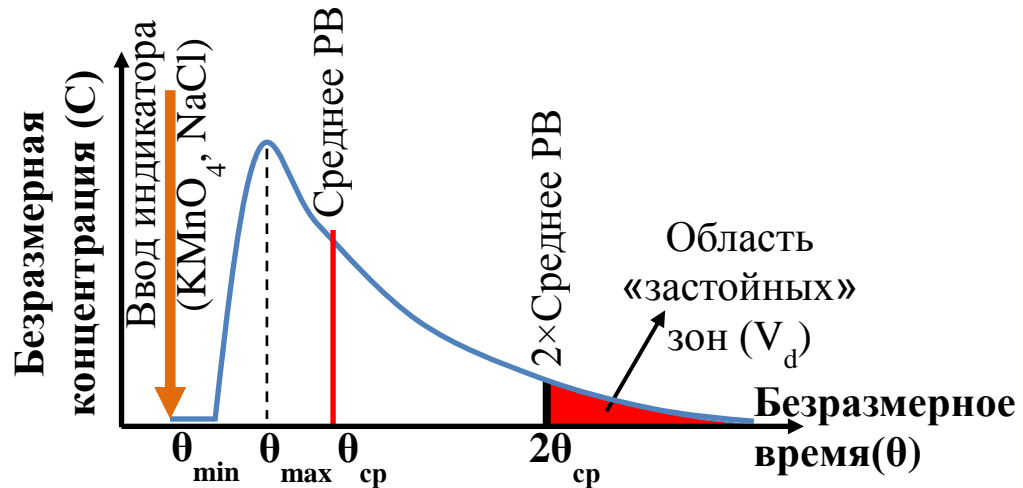


Рисунок 2.14 – Кривая распределения времени пребывания жидкости в промежуточном ковше базового варианта конструкции

Безразмерное время на i -ом временном шаге определяется по выражению:

$$\theta_i = \frac{t_i}{t_{cp}}, \quad (2.16)$$

где t_i – время эксперимента на i -ом шаге, с;

t_{cp} – среднее теоретическое время пребывания жидкости в промежуточном ковше, с.

Поскольку величина концентрации индикатора зависит от введенного количества, а сам по себе индикатор никакого отношения к работе агрегата не имеет и его количество для анализа процесса совершенно несущественно, то целесообразно преобразовать величину концентрации индикатора к безразмерному значению.

Безразмерная концентрация индикатора на i -ом временном шаге:

$$C_i = \frac{c_i V}{M}, \quad (2.17)$$

где c_i – концентрация индикатора в поступающей жидкости на i -ом шаге, г/м³;

M – общее количество введенного индикатора, г.

Для количественной оценки эффективности конструкции промежуточного ковша и различных гидродинамических элементов, установленных в нем весь объем промежуточного ковша условно разделяется на три области:

– область идеального вытеснения – это область, по которой индикатор транспортируется от входа в промежуточный ковш до выхода из разливочных стаканов;

– область идеального смешения – это область, в которой происходит замедление движения к разливочным стаканам за счет активной циркуляции жидкости с индикатором. Активная циркуляция способствует коагуляции и укрупнению докристаллизационных неметаллических включений, а, следовательно, их всплыванию к поверхности шлака;

– область застойной зоны – это область, которая не участвует в транспортировке индикатора. Увеличение объема данной области приводят к уменьшению области идеального смешения.

Расчет областей промежуточного ковша производится методом, предложенным исследователями R. Ahuja и Y. Sahai [186]:

$$V = V_m + V_p + V_d, \quad (2.18)$$

где V_m – объёмная доля зоны идеального смешения;

V_d – объёмная доля застойной зоны;

V_p – объёмная доля зоны идеального вытеснения;

$$V_m = 1 - \theta_{cp}, \quad (2.19)$$

где θ_{cp} – среднее безразмерное время пребывания жидкости в промежуточном ковше.

$$V_p = \frac{\theta_{\min} + \theta_{\max}}{2}, \quad (2.20)$$

где θ_{\min} – минимальное безразмерное время пребывания порции жидкости в промежуточном ковше;

θ_{\max} – безразмерное время достижения максимального значения концентрации индикатора.

Минимальное время пребывания порции жидкости в промежуточном ковше определяется разницей между временем ввода индикатора и временем достижения его разливочных стаканов.

$$V_m = 1 - V_d - V_p \quad (2.21)$$

Значение среднего безразмерного времени пребывания жидкости в промежуточном ковше рассчитывалось по выражению:

$$\theta_{cp} = \frac{\int_{\theta=0}^{\infty} \theta C d\theta}{\int_{\theta=0}^{\infty} C d\theta} \quad (2.22)$$

В случае регистрации концентрации индикатора на выходе из реактора через равные временные промежутки, то выражение (2.22) принимает вид:

$$\theta_{cp} = \frac{\int_{\theta=0}^{\infty} \theta C d\theta}{\int_{\theta=0}^{\infty} C d\theta} = \frac{\sum_{\theta=0}^{\infty} C_i \theta_i}{\sum_{\theta=0}^{\infty} C_i} = 1 \quad (2.23)$$

Данные полученные после $\theta=2$ относятся к объёмной доли застойной зоны, следовательно, выражение (2.23) принимает вид:

$$\theta_{cp} = \frac{\int_{\theta=0}^2 \theta C d\theta}{\int_{\theta=0}^2 C d\theta} = \frac{\sum_{\theta=0}^2 C_i \theta_i}{\sum_{\theta=0}^2 C_i} \quad (2.24)$$

Таким образом, метод исследования распределения времени пребывания жидкости позволяет количественно оценить эффективность конфигураций внутреннего объема промежуточного ковша для обеспечения рафинирования металлического расплава от неметаллических включений.

Для оценки времени достижения потока центральных и периферийных разливочных стаканов и получения кривой распределения времени пребывания жидкости в промежуточном ковше и основных её характеристик математическое моделирование проводили в нестационарной постановке, при этом в качестве индикатора использовали жидкость с физическими характеристиками аналогичными жидкой стали. Ввод индикатора осуществлялся в течении 5 с, затем непрерывно поступал поток жидкой стали, при этом шаг по времени задавался равным 0,01 с и постепенно увеличивался до 0,25 с.

Выводы

1) Выполнен анализ условий физического моделирования и определены основные критерии подобия и параметры для проектирования физической модели промежуточного ковша МНЛЗ;

2) Разработан лабораторно-экспериментальный комплекс для исследования гидродинамических процессов в промежуточном ковше и обоснована методика проведения исследований;

3) Выполнена программная реализация математической модели течения металлического расплава в промежуточном ковше методами вычислительной гидродинамики;

4) Обоснована методика количественной оценки эффективности гидродинамических элементов, используемых в промежуточном ковше.

3 Моделирование процессов гидродинамики в промежуточном ковше при непрерывной разливке стали

3.1 Исследование гидродинамических процессов в промежуточном ковше базовой конструкции

Моделирование гидродинамики металла в промежуточном ковше базовой конструкции проводили для условий разливки рельсовой стали через кристаллизатор сечением 300×360 мм при скорости 0,7 м/мин.

Результаты физического моделирования [187-189], подтвержденные численными исследованиями (рисунок 3.1), указывают на наличие высокоскоростных придонных потоков, направленных к разливочным стаканам. При этом время достижения центральных разливочных стаканов составляет 6¹ с, а периферийных 52 с после подачи индикатора.

Для анализа гидродинамических процессов в промежуточном ковше по результатам математического моделирования были построены эпюры скоростей по продольному сечению по стопорам в характерных областях промежуточного ковша (рисунок 3.2): по оси центрального разливочного стакана (эпюра 1), на расстоянии 1700 мм от оси защитной трубы (эпюра 2) и по оси периферийного защитного стакана (эпюра 3). Дополнительно, на том же расстоянии от оси защитной трубы были построены эпюры скоростей перпендикулярно передней стенке промежуточного ковша на расстоянии от 100 мм (эпюры 4-6), 450 мм (эпюры 7-9) и 800 мм (эпюры 10-12) от днища промежуточного ковша (рисунок 3.3). При этом знак «+» на эпюрах означает, что поток движется от центра промежуточного ковша к периферии (прямой поток), а знак «-» характеризует противоположное направление (обратный поток).

¹ Здесь и далее время соответствуют реальным условиям металлургического процесса.

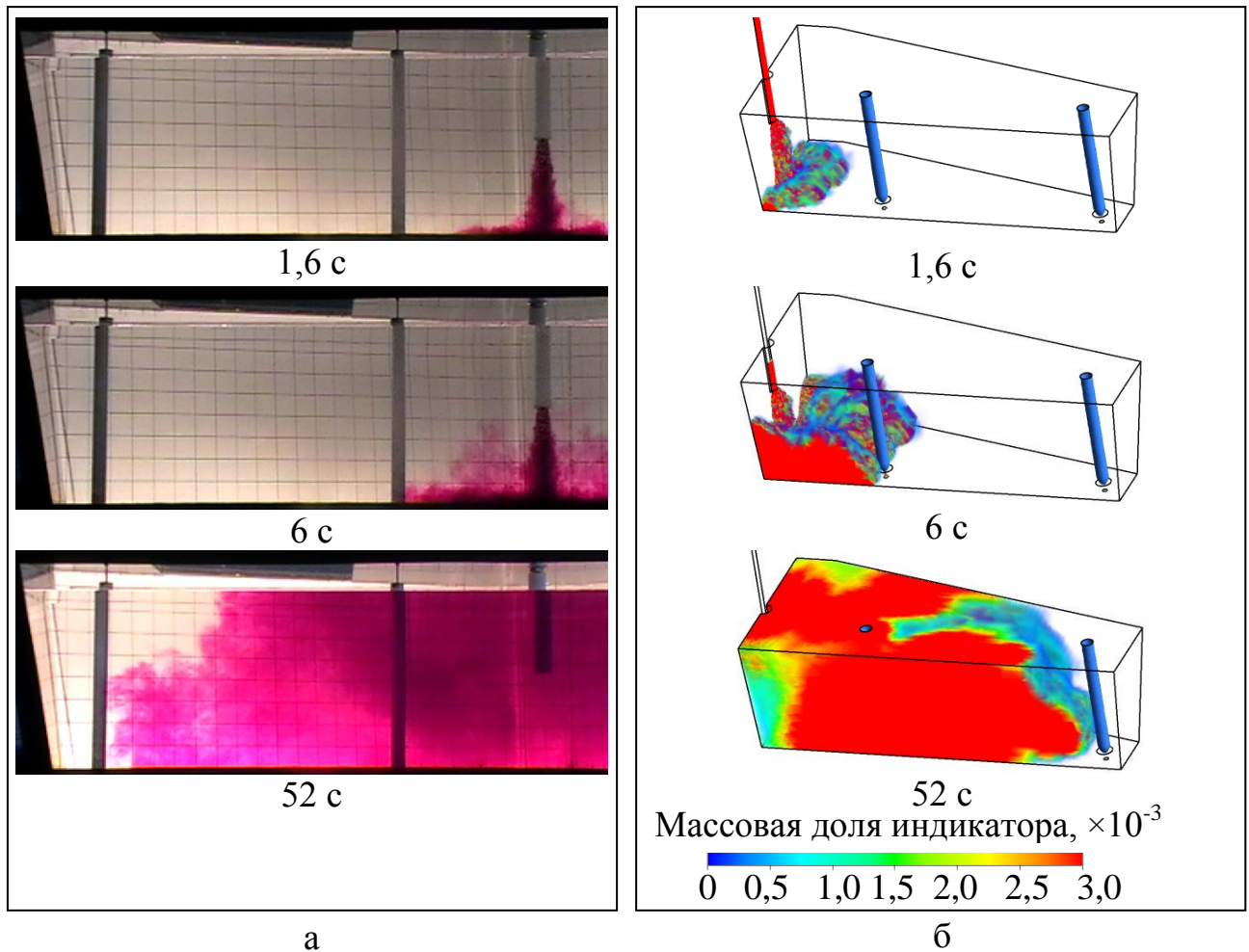
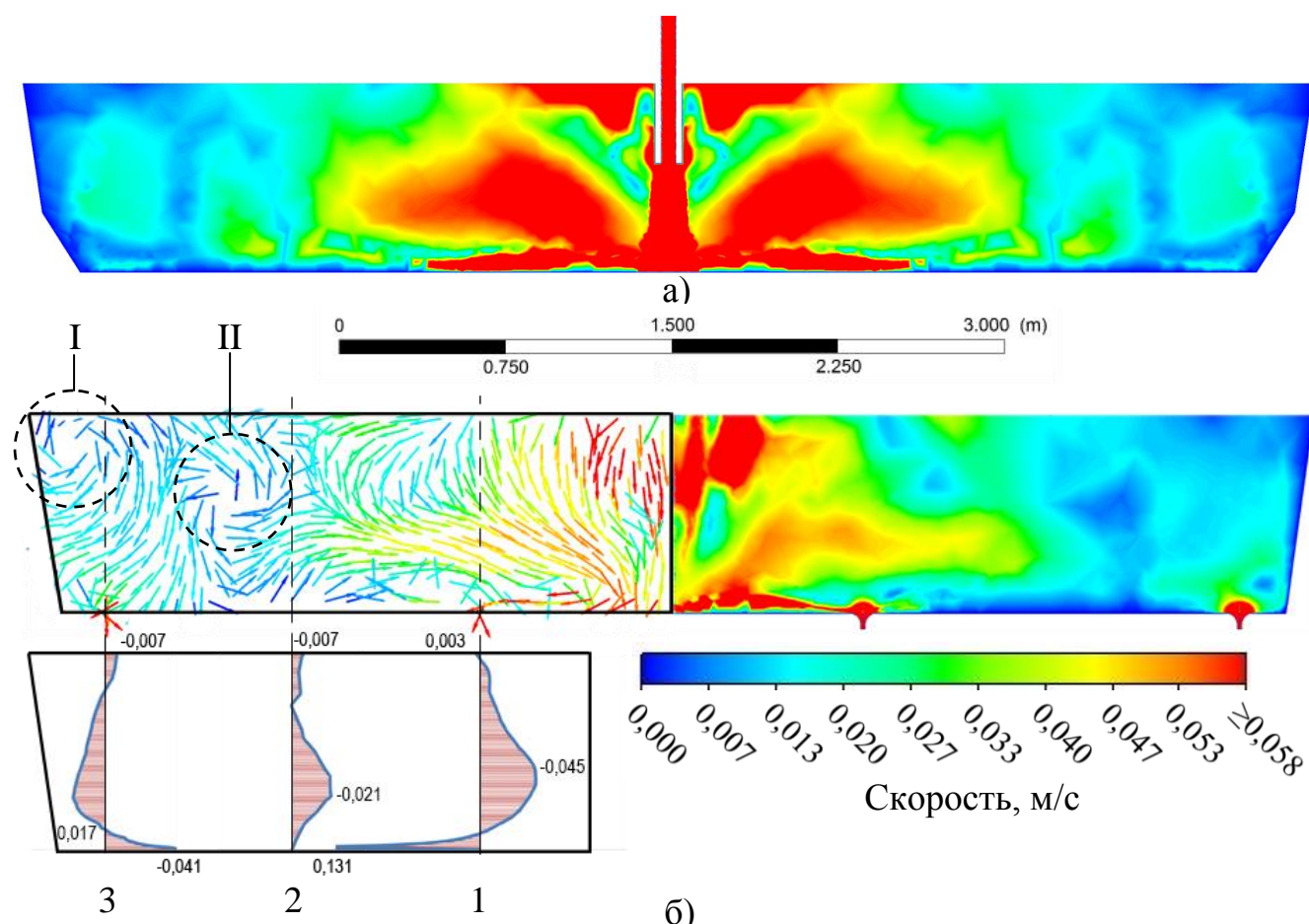


Рисунок 3.1 – Гидродинамическая картина в промежуточном ковше, полученная методами физического (а) и математического моделирования (б)

Поступающий из сталеразливочного ковша поток расплава, попадая в объем промежуточного ковша, достигает днища и разделяется, формируя высокоскоростные потоки. Одна часть потока движется в интервале скоростей 0,06-0,12 м/с (рисунок 3.2), достигая центра передней стенки, находящейся на минимальном расстоянии от оси защитной трубы разделяется на два потока: один движется к поверхности расплава, второй – вдоль передней стенки на расстоянии 0-100 мм от днища промежуточного ковша со скоростью, достигающей 0,112 м/с (рисунок 3.3, эпюра 4). При этом скорость движения потоков расплава у поверхности в области защитной трубы составляет 0,08-0,10 м/с (рисунки 3.2, 3.3). Часть потока движется со скоростью 0,06-0,11 м/с в придонных слоях к задним боковым стенкам, при достижении которых скорость снижается до 0,041 м/с (рисунок 3.3, эпюра 4). Отражаясь от боковых стенок, формируются обратные

потоки, проходящие через верхние и средние слои, при этом максимальная скорость обратных потоков, проходящих через средние слои (450 мм от дна) достигает 0,059 м/с (рисунок 3.3, эпюра 7). Скорость обратных потоков на расстоянии 800 мм от дна снижается и составляет 0,024 м/с (рисунок 3.3, эпюра 10). По оси центральных разливочных стаканов максимальная скорость обратных потоков составляет 0,045 м/с на расстоянии 300 мм от дна промежуточного ковша (рисунок 3.2, эпюра 1).

Анализ векторов скорости потоков расплава (рисунки 3.2-3.3) позволяет установить наличие в промежуточном ковше характерных вихревых областей – у торцевой стенки (рисунок 3.2, область I), между периферийным и центральным стопорами (рисунок 3.2, область II) и на поверхности расплава (рисунок 3.3, область III).



а – продольное сечение по защитной трубе; б – продольное сечение по стопорам

Рисунок 3.2 – Контурная карта результирующей скорости движения расплава параллельно плоскости XOY

В центральной области, на расстоянии 1700 мм от оси защитной трубы и на расстоянии 100 мм от дна вблизи задней боковой стенки скорость прямых придонных потоков достигает 0,034 м/с (рисунок 3.3, эпюра 5), в средних слоях скорость обратных потоков достигает 0,019 м/с (рисунок 3.3, эпюра 8), а в верхних слоях 0,024 м/с (рисунок 3.3, эпюра 11).

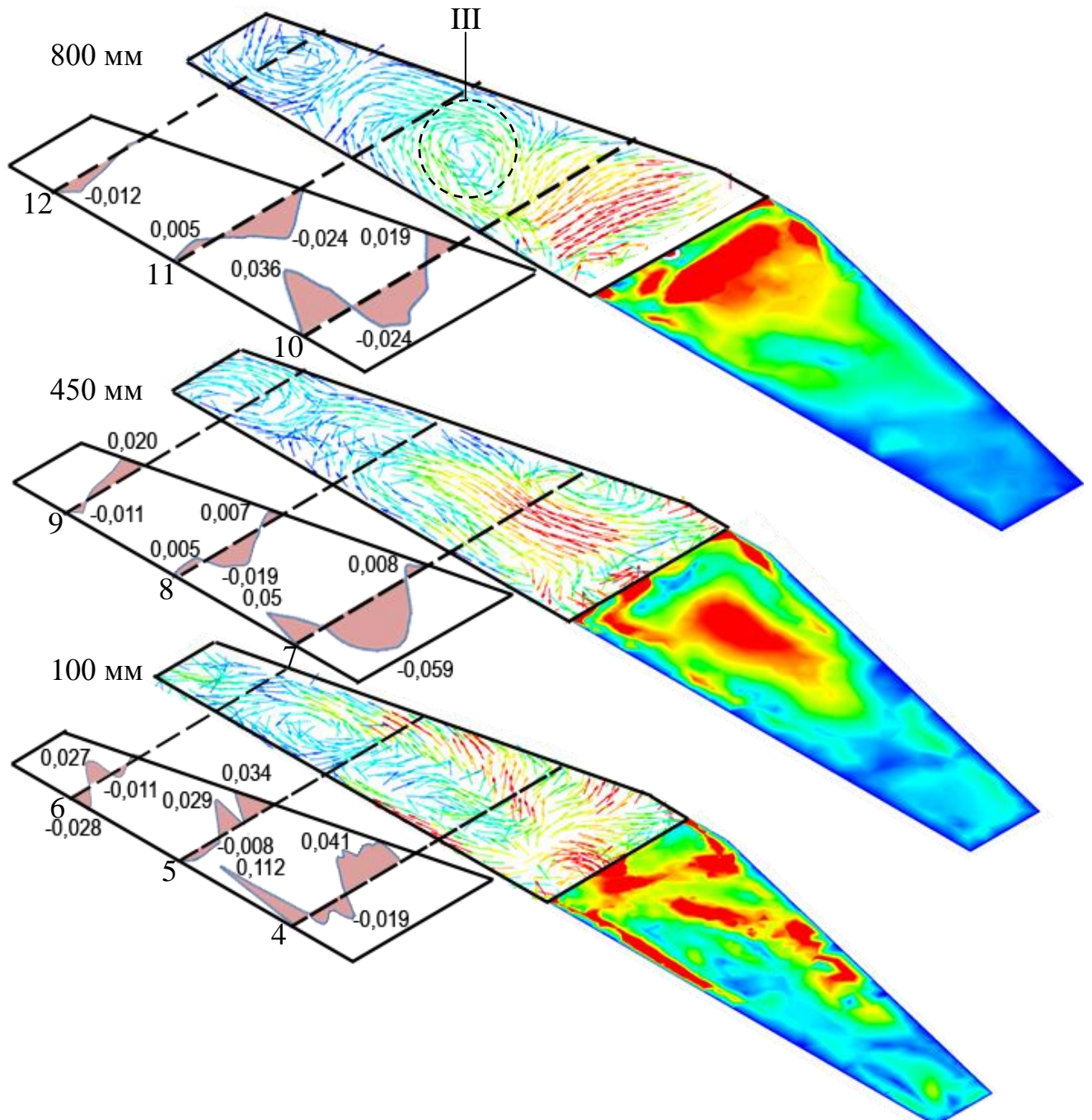
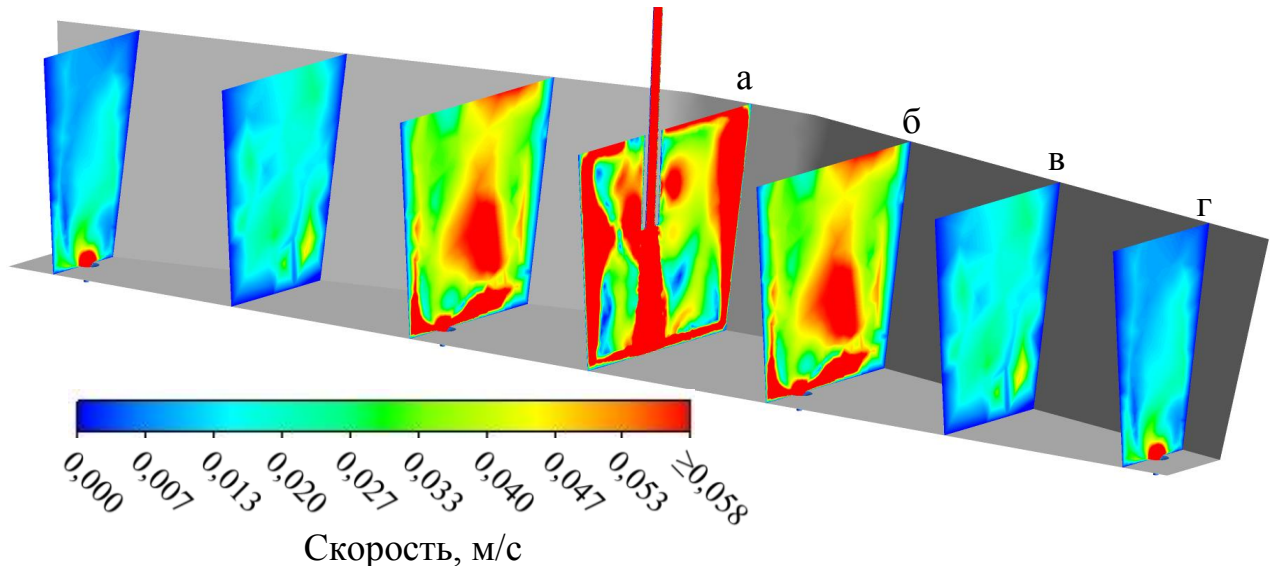


Рисунок 3.3 – Контурная карта результирующей скорости движения расплава в отдельных сечения промежуточного ковша относительно дна

Часть придонных потоков направляется к центральным разливочным стаканам на расстоянии 0-50 мм от днища промежуточного ковша со скоростью достигающей 0,131 м/с (рисунок 3.2, эпюра 1), создавая «короткие пути». После достижения центральных разливочных стаканов скорость придонного потока затухает (рисунок 3.2, эпюра 2).



а – поперечное сечение по оси защитной трубы; б – поперечное сечение по оси центральных разливочных стаканов; в – поперечное сечение на расстоянии 1700 мм от оси защитной трубы; г – поперечное сечение по оси периферийных разливочных стаканов

Рисунок 3.4 – Гидродинамическая картина движения расплава в поперечных сечениях промежуточного ковша относительно оси защитной трубы (базовый вариант)

При движении к периферийным разливочным стаканам наблюдается снижение скорости потоков расплава.

В зоне периферийных стопоров и торцевых стенок наблюдается наличие застойных зон, что в реальных условиях способствует температурной и химической неоднородности металлического расплава. В реальном промежуточном ковше такое неравномерное распределение потоков и неудовлетворительное перемешивание металла приводит к попаданию в

кристаллизатор и далее в непрерывнолитую заготовку неметаллических включений.

Траектории движения потоков расплава, полученные при физическом и математическом моделировании, представлены на рисунках 3.5, 3.6.

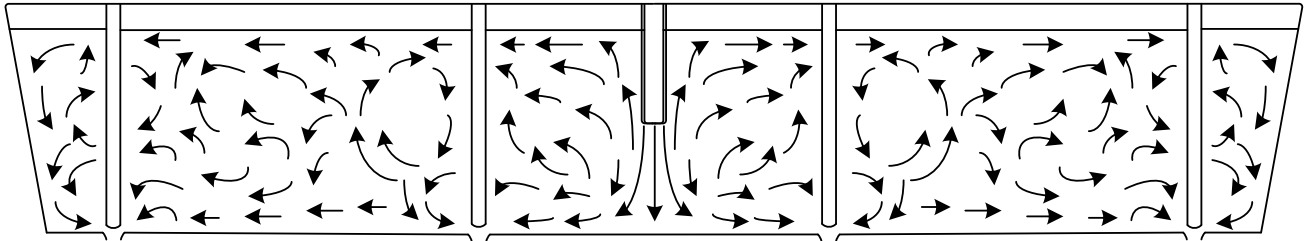


Рисунок 3.5 – Схема распределения потоков моделирующей жидкости в промежуточном ковше

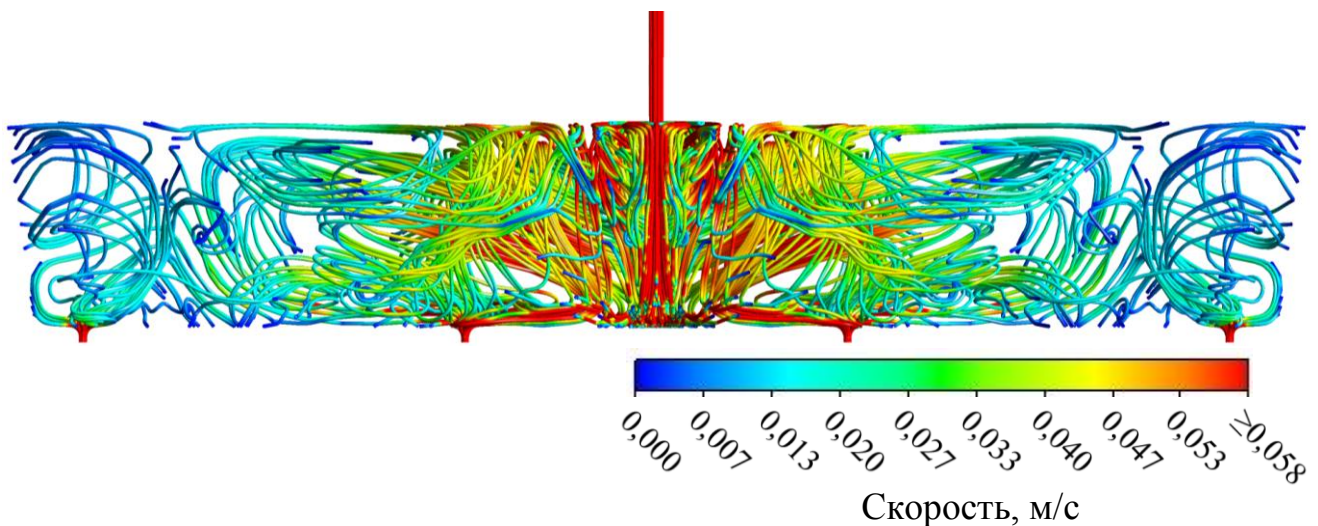


Рисунок 3.6 – Линии движения потоков металла в промежуточном ковше

В результате анализа данных длин линий траектории движения расплава, полученных при математическом моделировании (рисунок 3.6), установлено, что более 64 % линий имеют длину от 0 до 4,4 м (рисунок 3.7) и лишь 8 % линий имеют длину более 8,8 м, что подтверждает наличие большого числа коротких путей движения расплава. При этом минимальная длина линий составила 0,81 м, а максимальная – 40,35 м.

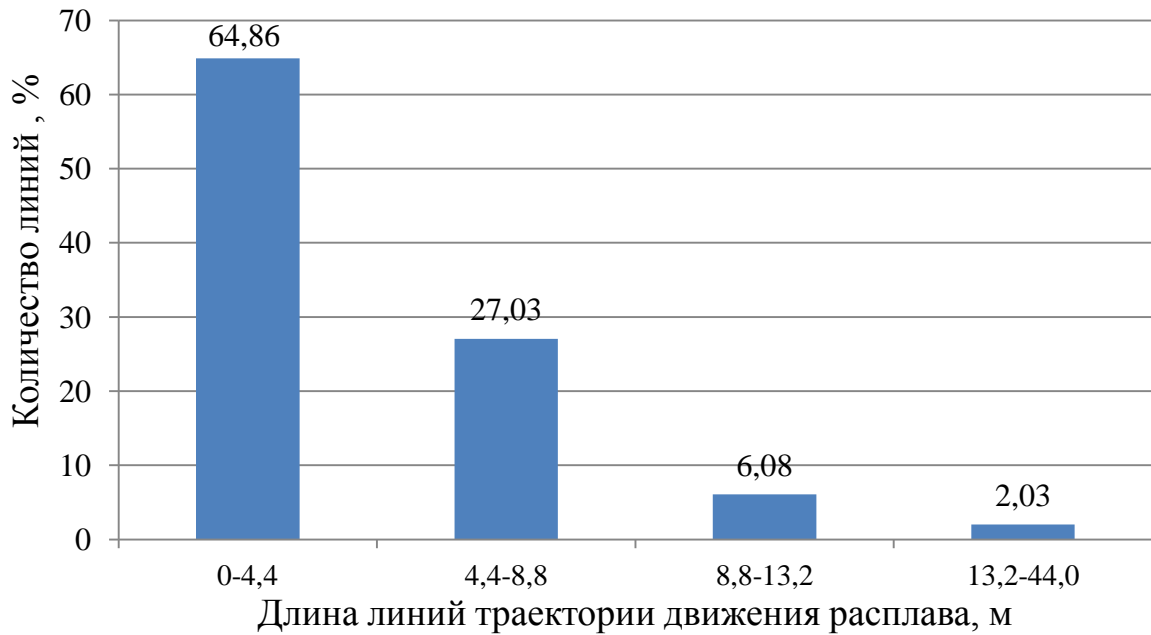


Рисунок 3.7 – Распределение длин линий траектории движения расплава

Анализ данных, полученных кондуктометрическим методом при физическом моделировании, представленный на рисунке 3.8, подтверждает минимальное время достижения жидкости центральных и периферийных разливающих стаканов промежуточного ковша – 6 и 52 с, соответственно.

Из графика (рисунок 3.8) видно, что распределение частиц NaCl в объеме промежуточного ковша неравномерно и волнообразно, так при достижении первого пикового значения концентрации (на центральном датчике) через 11 с концентрация соли в воде резко понижается. На периферийном датчике, не наблюдаются явно выраженных пиковых значений. Полученные кондуктометрическим методом на физической модели данные подтверждают неравномерное распределение потоков металла в промежуточном ковше базовой конструкции. При этом, к периферийным ручьям поступает более гомогенизированный металл.

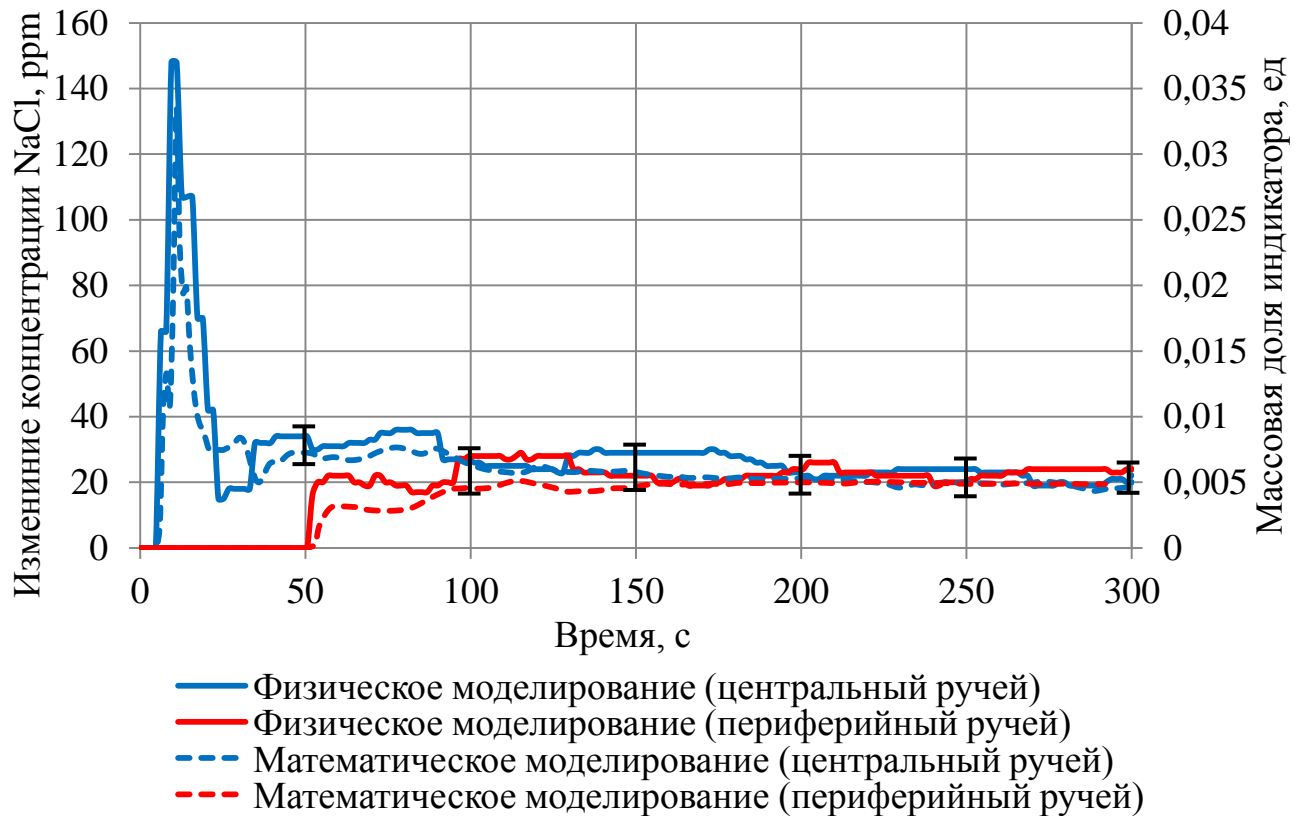


Рисунок 3.8 – Изменение концентрации индикатора по ходу эксперимента

Согласно методике, описанной в разделе 2.3 результирующая кривая распределения времени пребывания расплава в промежуточном ковше примет следующий вид (рисунок 3.9).

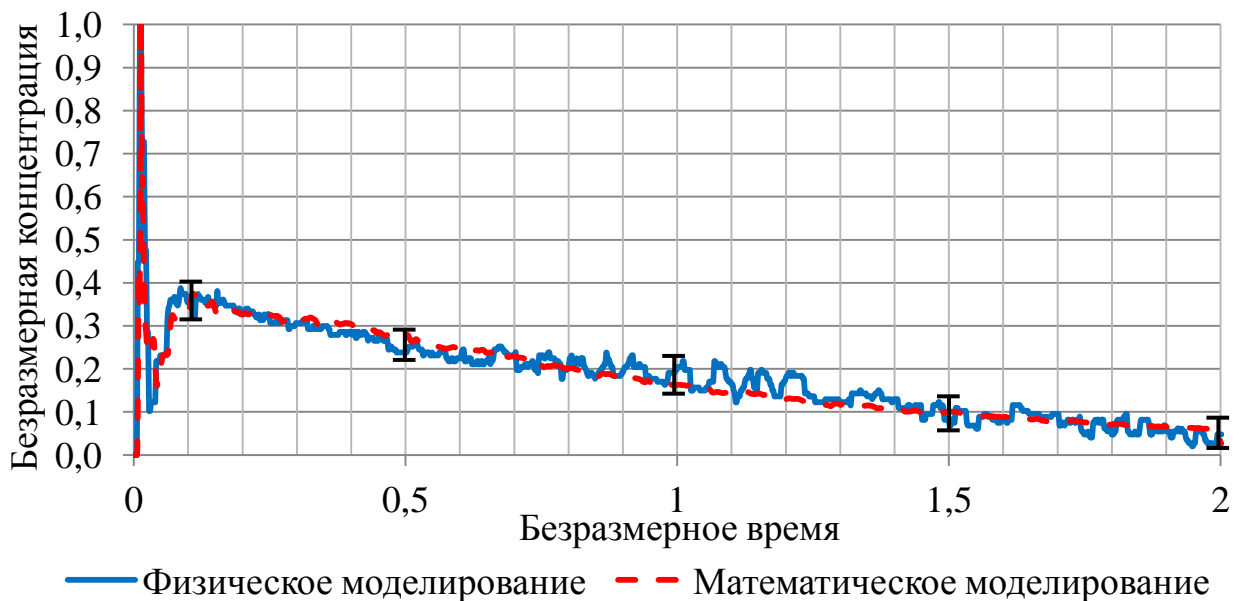


Рисунок 3.9 – Кривая распределения времени пребывания моделирующей жидкости в промежуточном ковше

Основные характеристики кривой распределения времени пребывания жидкости в объеме промежуточного ковша базового варианта конструкции представлены в таблице 3.1.

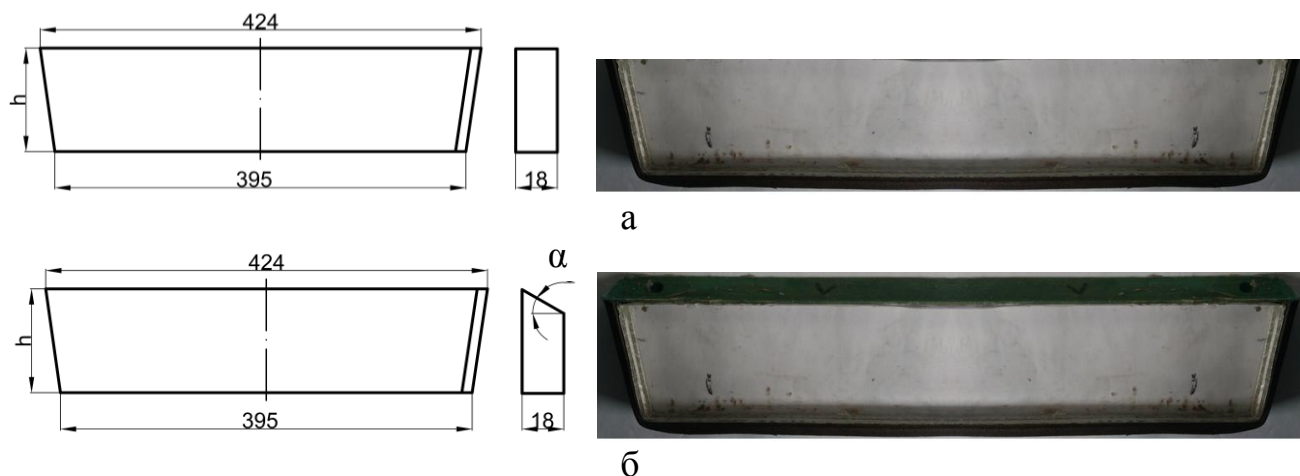
Таблица 3.1 – Основные характеристики кривой распределения времени пребывания жидкости в объеме промежуточного ковша базового варианта конструкции

Моделирование	t_{\min} , с	t_{\max} , с	$t_{\text{ср}}$, с	θ_{\min} , ед.	θ_{\max} , ед.	$\theta_{\text{ср}}$, ед.	V_p , %	V_m , %	V_d , %
Физическое	29,2	63,2	843,6	0,035	0,074	0,720	5,482	66,565	27,953
Математическое	29	63,5	843,6	0,034	0,075	0,715	5,480	65,992	28,526
Отклонение, %	0,68	0,47	-	2,85	1,35	0,69	0,03	0,86	2,05

Таким образом, анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод о том, что объем застойных зон в промежуточном ковше базового варианта конструкции составляет ~28 %, при этом объем зон идеального вытеснения и идеального смешения составляет ~5,5 % и ~66,5 % соответственно, а наличие коротких путей к центральным разливочным стаканам не позволяет обеспечить в полной мере гомогенизацию металлического расплава по химическому составу и температуре, а также рафинирование металлического расплава от неметаллических включений и требуется применение дополнительных огнеупорных элементов для организации движения потоков металла, увеличения минимального времени пребывания порции металла в объеме промежуточного ковша и создания зон активной циркуляции расплава и уменьшения объема застойных зон.

3.2 Исследование гидродинамических процессов в промежуточном ковше оборудованном порогами

Дальнейшие исследования гидродинамики металла в промежуточном ковше проводили с использованием порогов различных конфигураций (рисунок 3.10), схема установки которых представлена на рисунке 3.11 [188,189].



а – порог с прямым верхом; б – порог с косым верхом

Рисунок 3.10 – Модели порогов для промежуточного ковша

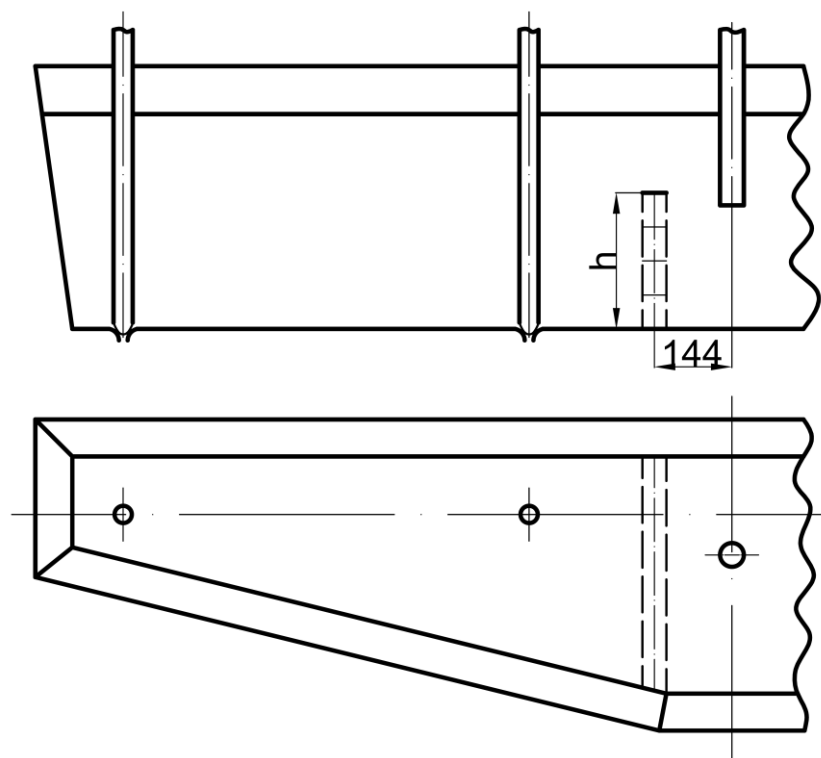


Рисунок 3.11 – Схема различных вариантов установки порогов в промежуточном ковше

Согласно исследованиям [137] при превышении максимально допустимой скорости на границе раздела металл-шлак равной 0,13-0,2 м/с происходит затягивание шлакообразующей смеси, максимальная высота порога регламентируются максимально допустимой скоростью в поверхностном слое, и может быть рассчитана по следующему выражению [137]:

$$h \leq H - \frac{6k_v Q}{l_0 [u_{\text{п}}]} \quad (2.24)$$

где H – высота уровня металла в промежуточном ковше, м;

K_v – коэффициент, учитывающий влияние стенок промежуточного ковша;

Q – расход металла, поступающего в промежуточный ковш, м³/с;

l_0 – ширина порога, м;

$[u_{\text{п}}]$ – допустимая скорость на границе раздела металл-шлак, м/с. Принята равной 0,13 м/с.

$$h \leq 0,9 - \frac{6 \cdot 1,5 \cdot 0,005}{1,06 \cdot 0,13} = 0,57 \text{ м.} \quad (2.25)$$

С учетом линейного масштаба, высота физической модели порога не должна превышать 228 мм. Конструктивные параметры физических моделей порогов представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Конструктивные параметры физических моделей порогов

Вариант	Высота (h), мм	Угол среза верха (α), градус
А/Б	228	0/30
В/Г	171	
Д/Е	114	
Ж/З	57	

Сравнительные результаты физического и математического моделирования гидродинамических процессов в промежуточном ковше при использовании порогов различной конфигурации по минимальному времени достижения порции модельной жидкости центральных и периферийных разливочных стаканов и объему застойных зон представлены на рисунках 3.12, 3.13.

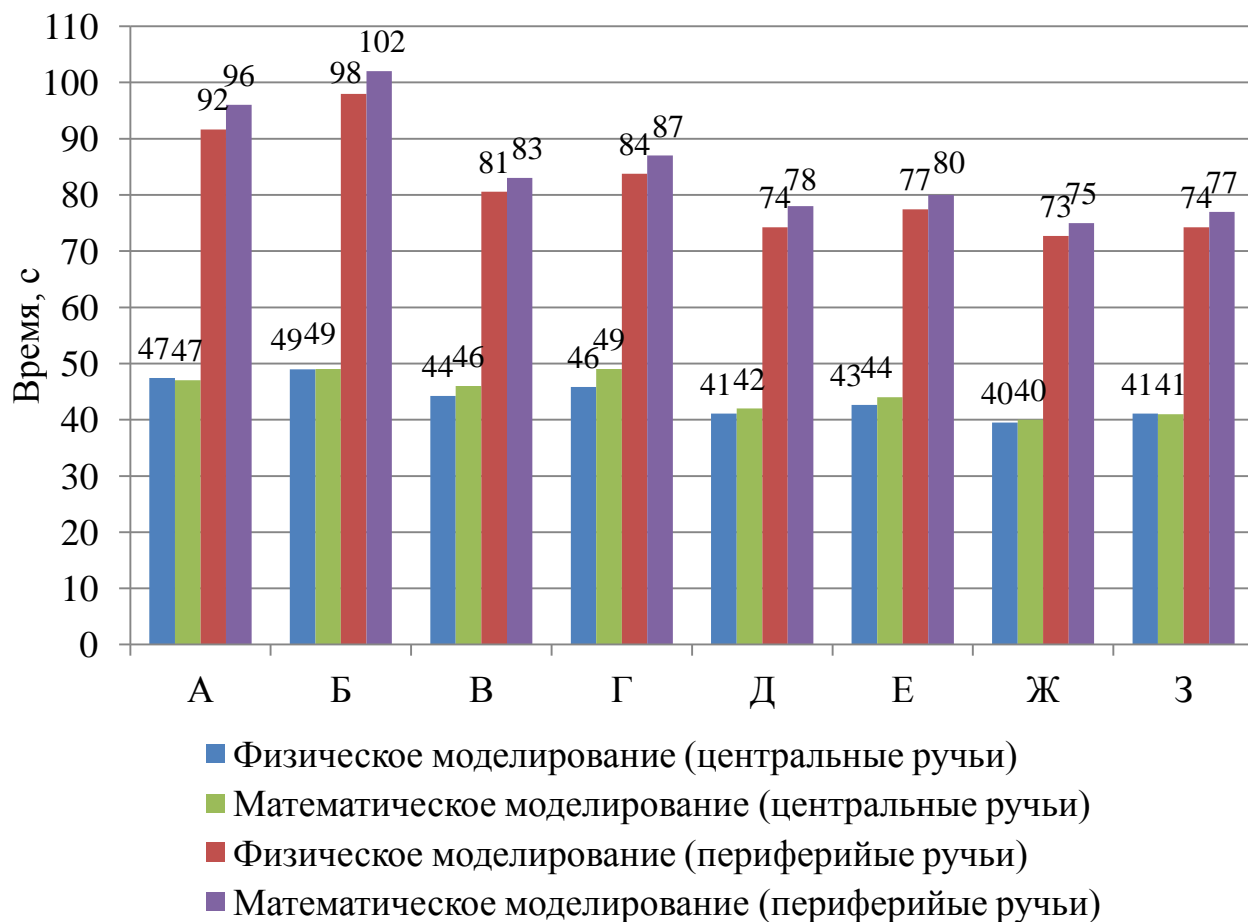


Рисунок 3.12 – Минимальное время достижения потока разливочных стаканов при использовании различных вариантов конфигурации порогов

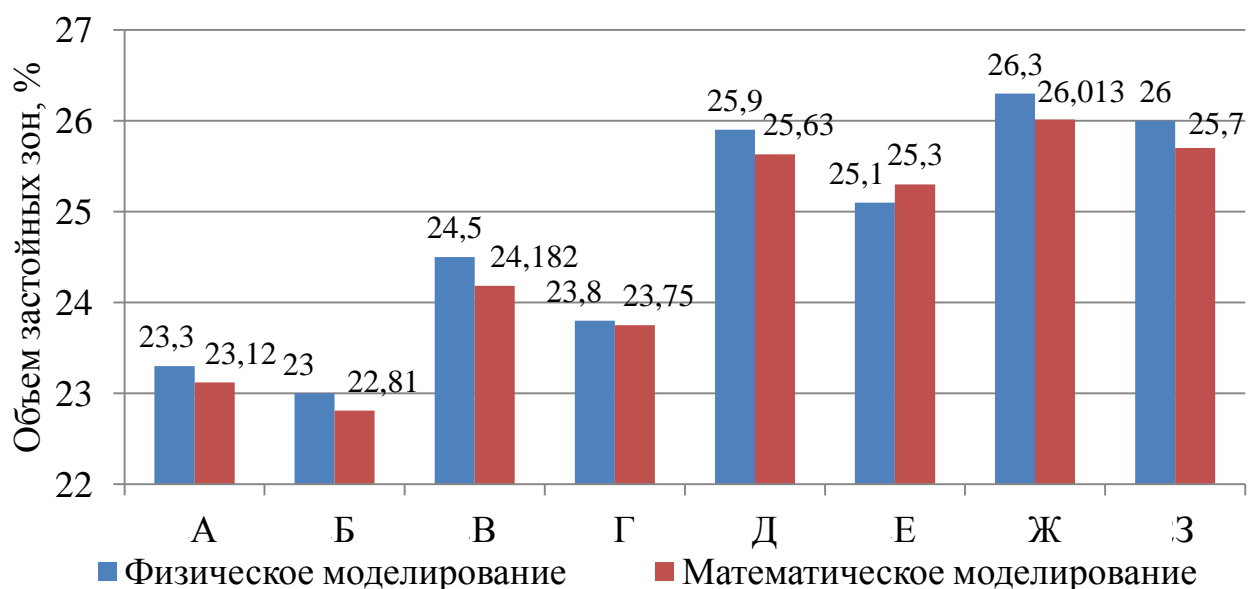


Рисунок 3.13 – Объём застойных зон промежуточного ковша при использовании порогов различных вариантов конфигурации, %

Сравнение отношения минимального времени достижения потока моделирующей жидкости разливочных стаканов к высоте порогов с прямым (варианты А, В, Д, Ж) и косым срезом (варианты Б, Г, Е, З) при физическом и математическом моделировании представлены на рисунках 3.14, 3.15.

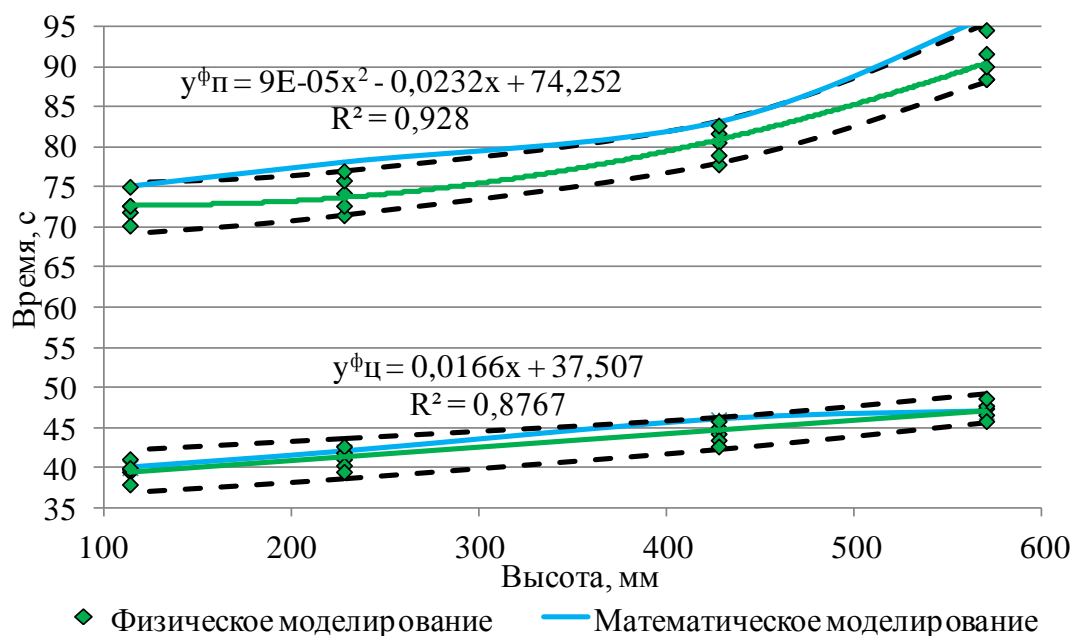


Рисунок 3.14 – Отношение минимального времени достижения потока моделирующей жидкости разливочных стаканов к высоте порогов при физическом и математическом моделировании

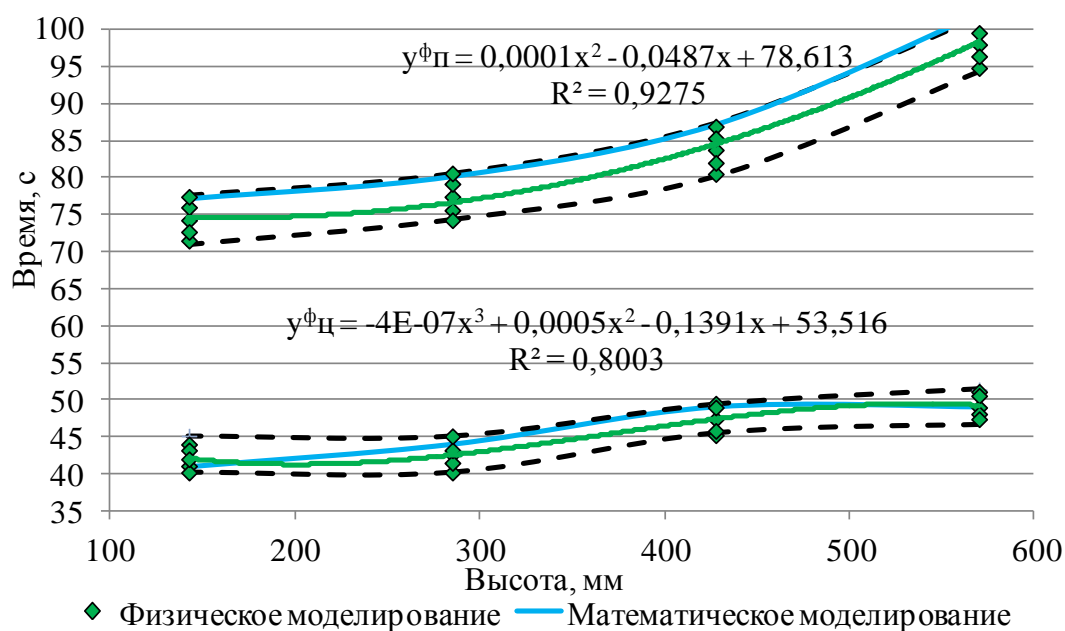


Рисунок 3.15 – Отношение минимального времени достижения потока моделирующей жидкости разливочных стаканов к высоте порогов с косым верхом при физическом и математическом моделировании

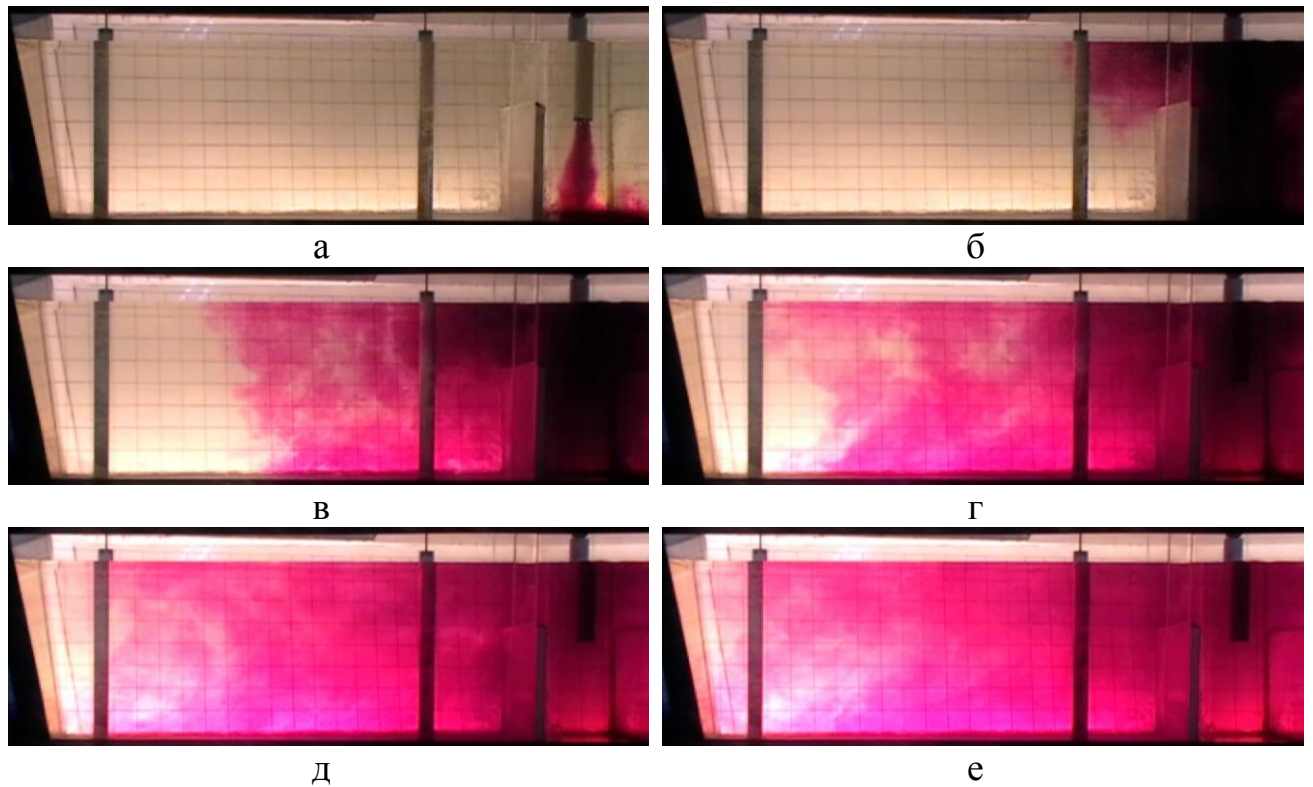
Основные характеристики кривых распределения времени пребывания жидкости в объеме промежуточного ковша при использовании порогов различных вариантов представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Основные характеристики кривой распределения времени пребывания моделирующей жидкости в объеме промежуточного ковша при использовании порогов различной конфигурации

Вариант конфигурации перегородок	Основные характеристики								
	t _{min} , с	t _{max} , с	t _{ср} , с	θ _{min} , ед.	θ _{max} , ед.	θ _{ср} , ед.	V _p , %	V _m , %	V _d , %
Физическое моделирование (в пересчете на реальный объект)									
Вариант А	69,52	135,1	843,6	0,082	0,160	0,767	12,1	64,60	23,3
Вариант Б	73,47	140,6		0,088	0,167	0,77	12,74	64,26	23
Вариант В	62,41	111,4		0,074	0,134	0,755	10,42	65,08	24,5
Вариант Г	65,57	118,5		0,08	0,141	0,762	11,04	65,16	23,8
Вариант Д	57,67	98,8		0,067	0,117	0,741	9,22	64,88	25,9
Вариант Е	60,04	106,6		0,071	0,127	0,749	9,91	64,99	25,1
Вариант Ж	56,09	95,6		0,066	0,113	0,737	8,97	64,73	26,3
Вариант З	57,67	87,3		0,067	0,116	0,74	9,16	64,84	26
Математическое моделирование									
Вариант А	71,5	134	843,6	0,085	0,159	0,769	12,18	64,700	23,12
Вариант Б	75,5	140		0,089	0,166	0,772	12,732	64,458	22,81
Вариант В	64,5	113,5		0,076	0,135	0,758	10,528	65,290	24,18
Вариант Г	68	115,5		0,081	0,137	0,763	10,905	65,345	23,75
Вариант Д	60	97,5		0,071	0,116	0,744	9,345	65,025	25,63
Вариант Е	62	104		0,073	0,120	0,747	9,63	65,070	25,3
Вариант Ж	57,5	100		0,069	0,119	0,740	9,416	64,571	26,01
Вариант З	59	83,5		0,07	0,121	0,743	9,546	64,754	25,7
Отклонение результатов моделирования, %									
Вариант А	2,85	0,81	-	3,66	0,88	0,23	0,66	0,15	0,77
Вариант Б	2,76	0,43		1,14	0,70	0,25	0,06	0,31	0,83
Вариант В	3,35	1,89		2,70	0,12	0,42	1,04	0,32	1,30
Вариант Г	3,71	2,53		1,25	2,63	0,07	1,22	0,28	0,21
Вариант Д	4,04	1,32		5,97	1,28	0,36	1,36	0,22	1,04
Вариант Е	3,26	2,44		2,82	5,97	0,27	2,83	0,12	0,80
Вариант Ж	2,51	4,60		4,55	5,22	0,39	4,97	0,25	1,09
Вариант З	2,31	4,35		4,48	4,06	0,41	4,21	0,13	1,15

Из анализа результатов физического и математического моделирования гидродинамических процессов в промежуточном ковше при использовании

порогов различной конфигурации (рисунки 3.12-3.15 и таблица 3.3) следует, что с увеличением высоты порогов минимальное время достижения потока моделирующей жидкости разливочных стаканов возрастает, чему способствует применение порогов с косым верхом, при этом конфигурация порогов варианта Б является наиболее рациональной, а гидродинамическая картина в промежуточном ковше при их установке принимает следующий вид (рисунок 3.16).

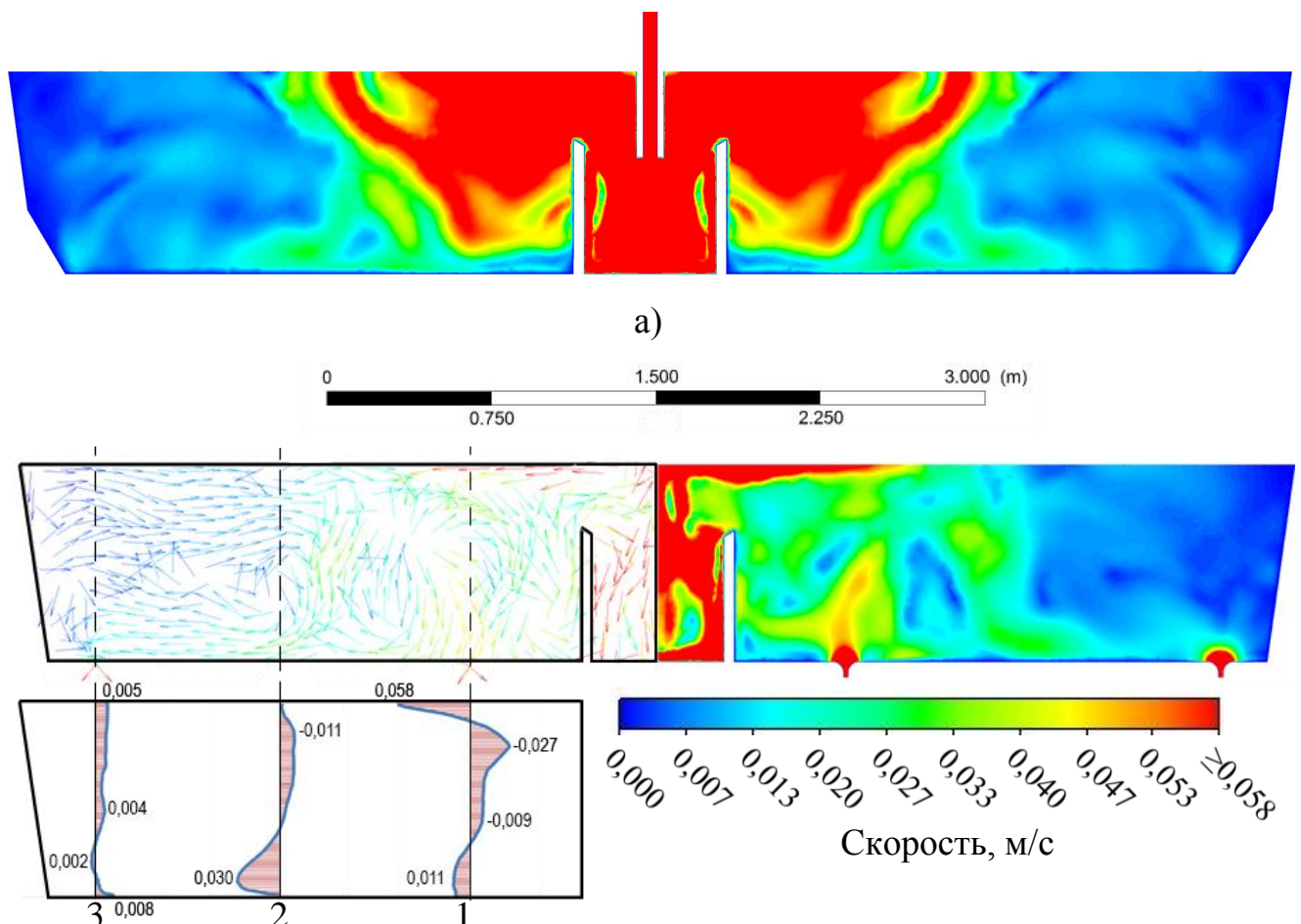


а – через 2 с.; б – через 16 с.; в – через 49 с.; г – через 87 с.;
д – через 98 с.; е – через 119 с.

Рисунок 3.16 – Гидродинамическая картина в промежуточном ковше с использованием порогов (вариант Б)

При столкновении с порогом основной поток теряет часть кинетической энергии и направляется вдоль порога к поверхности моделирующей жидкости, отражаясь от которой ниспадает к днищу и достигает центральных разливочных стаканов на 49 с эксперимента. Далее поток направляется к периферийным разливочным стаканам и достигает их на 98 с эксперимента.

Поток расплава, поступающий из сталеразливочного ковша через защитную трубу достигая днища со скоростью 0,48-0,50 м/с разделяется на четыре основных части. Одна часть основного потока, со скоростью 0,17-0,20 м/с (рисунок 3.17) движется к задней центральной стенке, достигая которой разделяется на две части, одна движется вдоль нее к поверхности расплава и далее вдоль поверхности со скоростью 0,09-0,12 м/с (рисунки 3.17-3.19) к защитной трубе формируя контур циркуляции, другая часть потока направляется к поверхности над порогом.



а – продольное сечение по защитной трубе; б – продольное сечение по стопорам

Рисунок 3.17 – Контурная карта результирующей скорости движения расплава параллельно плоскости XOY при использовании перегородок (вариант Б)

Вторая часть основного потока движется с аналогичной скоростью в противоположном направлении достигая центральной области передней стенки и также разделяется на два потока, один из которых направляется к защитной трубе

двигаясь вдоль передней стенки и поверхности расплава формируя поперечный промежуточный ковш контур циркуляции, второй поток движется к поверхности в область над порогом.

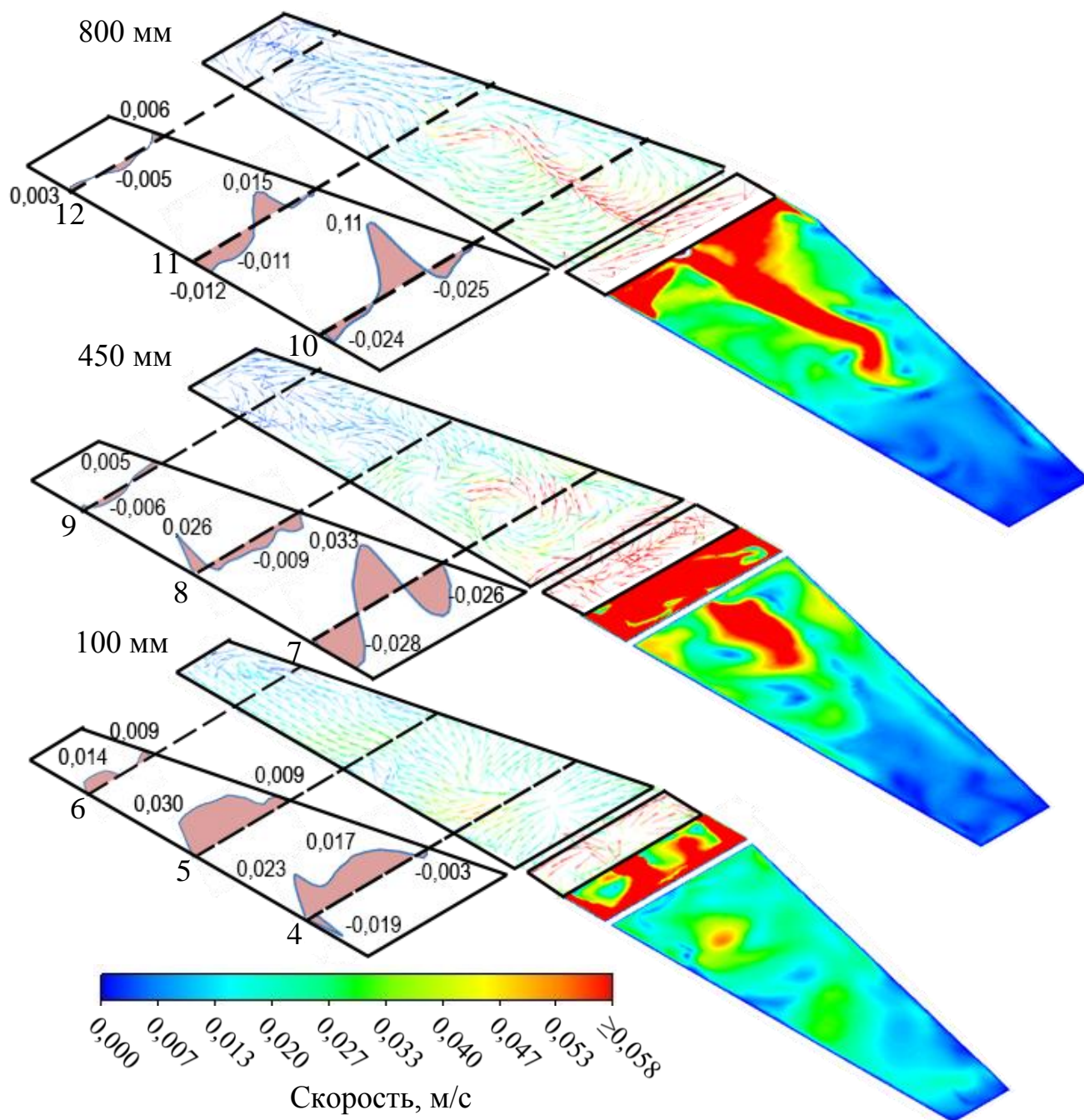
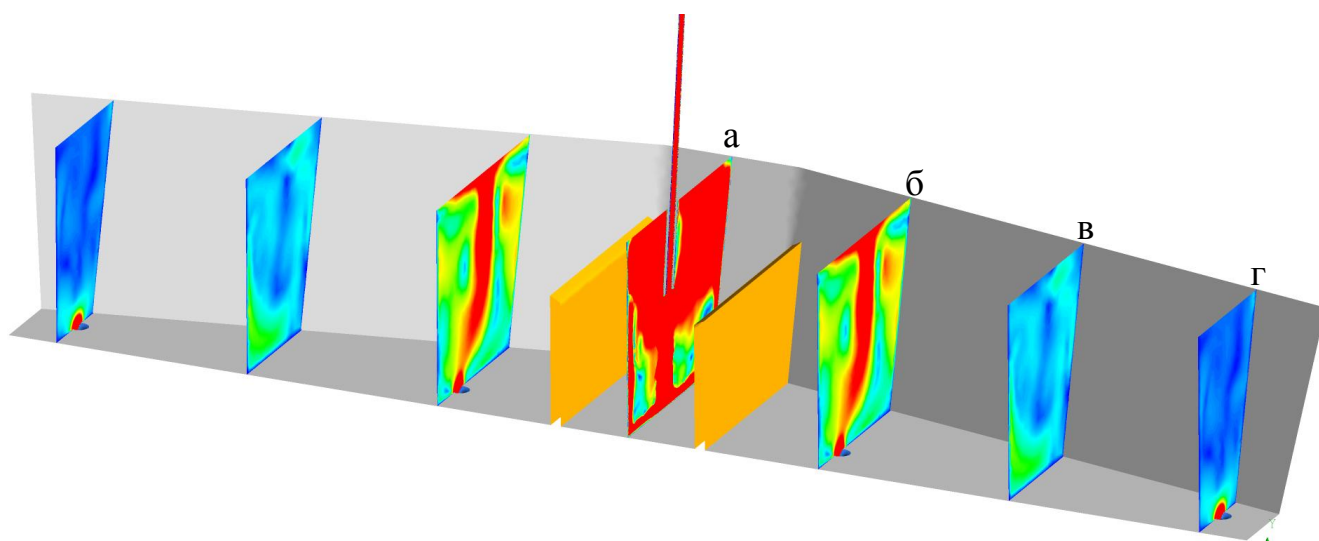


Рисунок 3.18 – Контурная карта результирующей скорости движения расплава в отдельных сечения промежуточного ковша относительно дна при установке порогов (вариант Б)

Таким образом, в центральной области над порогом соединяются два потока отраженных от передней и задней стенок формируя единый поток, который

движется вдоль поверхности к периферийным разливочным стаканам, при этом скорость в поверхностных слоях вдоль оси центральных разливочных стаканов достигает 0,058 м/с (рисунок 3.17, эпюра 1) в на расстоянии 800 мм от днища его скорость достигает 0,11 м/с (рисунок 3.18, эпюра 10), а средних – 0,033 м/с (рисунок 3.18, эпюра 7) на расстоянии 1400-1500 мм от оси защитной трубы поток ниспадает и продолжает движение в придонных слоях со скоростью 0,030 м/с (рисунок 3.17, эпюра 2, рисунок 3.18, эпюра 5) к периферийным разливочным стаканам, скорость по периферийных разливочных стаканов не превышает 0,008 м/с (рисунок 3.17, эпюра 3). Часть потока направляется к центральному разливочному стакану формируя при этом обратные потоки вдоль оси центральных разливочных стаканов в верхних слоях скорость, которых достигает -0,027 м/с (рисунок 3.17, эпюра 1), другая часть направляется к периферийным разливочным стаканам.



а – поперечное сечение по оси защитной трубы; б – поперечное сечение по оси центральных разливочных стаканов; в – поперечное сечение на расстоянии 1700 мм от оси защитной трубы; г – поперечное сечение по оси периферийных разливочных стаканов

Рисунок 3.19 – Контурная карта результирующей скорости движения расплава в поперечных сечениях промежуточного ковша относительно оси защитной трубы при установке порогов (вариант Б)

Другая часть основного потока направляется к порогу со скоростью 0,22-0,24 м/с, при столкновении с которым происходит снижение скорости до 0,12-0,14 м/с и поток движется вдоль порога, пересекает его и направляется к центральному разливочному стакану.

Из траектории движения потоков расплава (рисунки 3.20, 3.21) и полей скоростей (рисунки 3.17-3.19) видно, что в области периферийных разливочных стаканов и у торцевых стенок наблюдаются застойные низкоскоростные зоны.

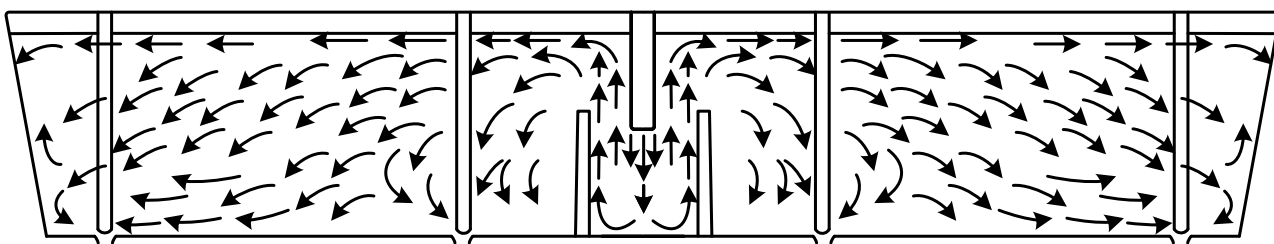


Рисунок 3.20 – Схема распределения потоков моделирующей жидкости в промежуточном ковше с использованием порогов

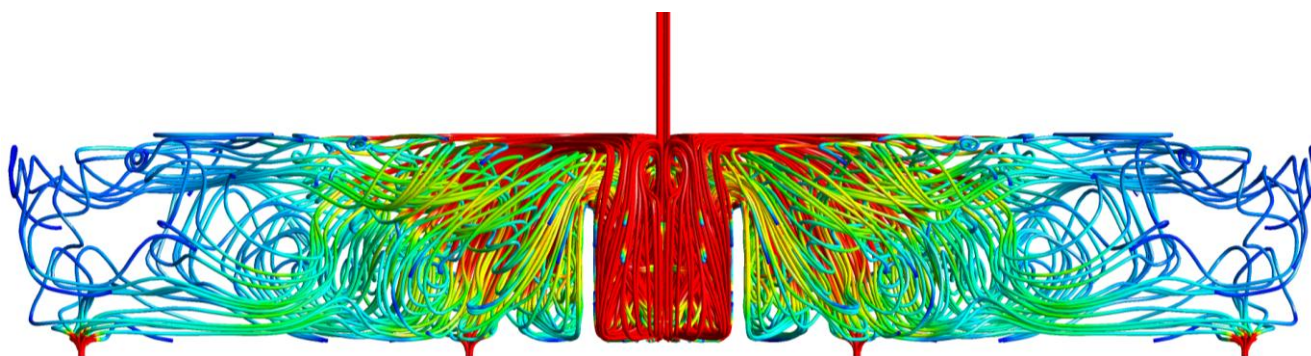


Рисунок 3.21 – Линии движения потоков металла в промежуточном ковше

Анализ данных, полученных кондуктометрическим методом, представленный на рисунке 3.22, подтвердил минимальное время достижения жидкости центральных и периферийных разливочных стаканов промежуточного ковша – 49 и 98 с соответственно.

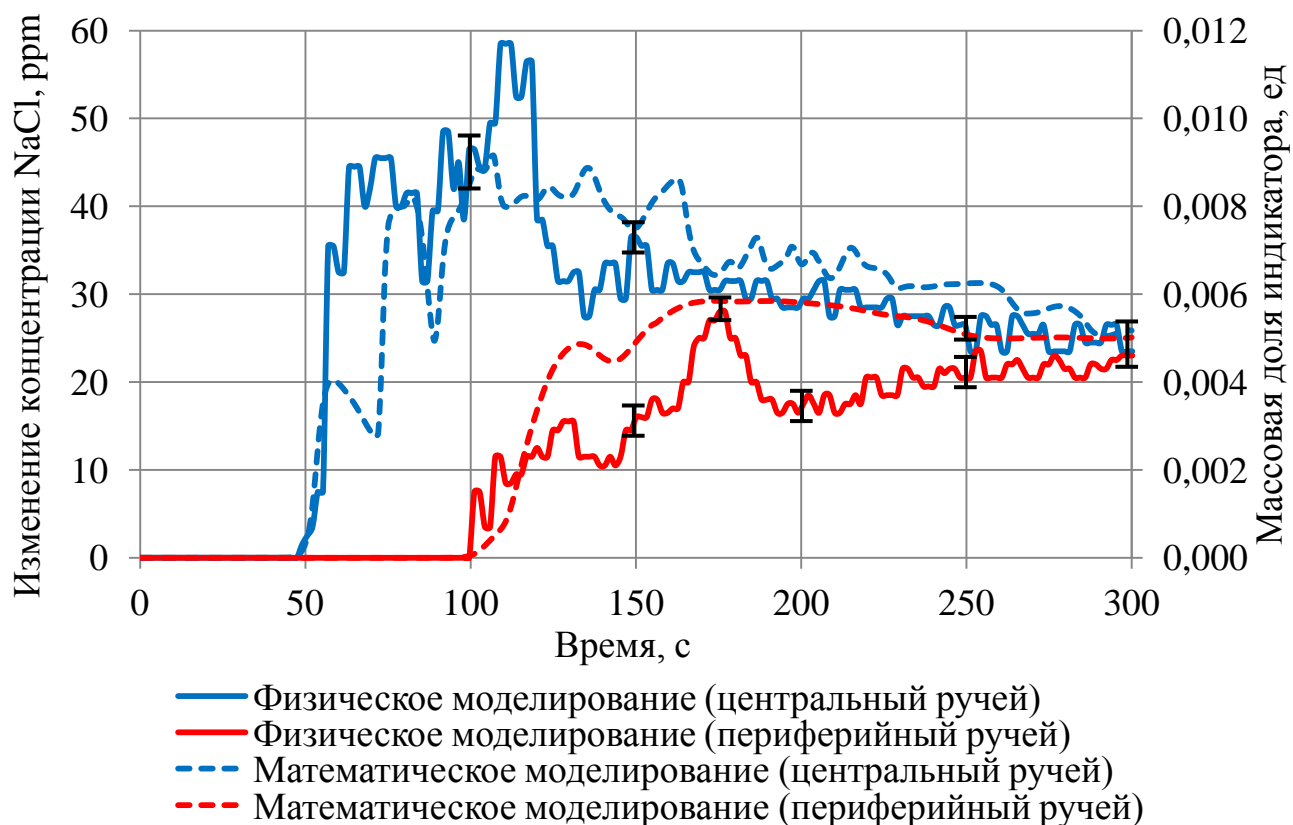


Рисунок 3.22 – Изменение концентрации индикатора по ходу процесса при использовании в промежуточном ковше порогов (вариант Б)

Кривая распределения времени пребывания жидкости в промежуточном ковше при использовании порогов (вариант Б) примет следующий вид (рисунок 3.23).

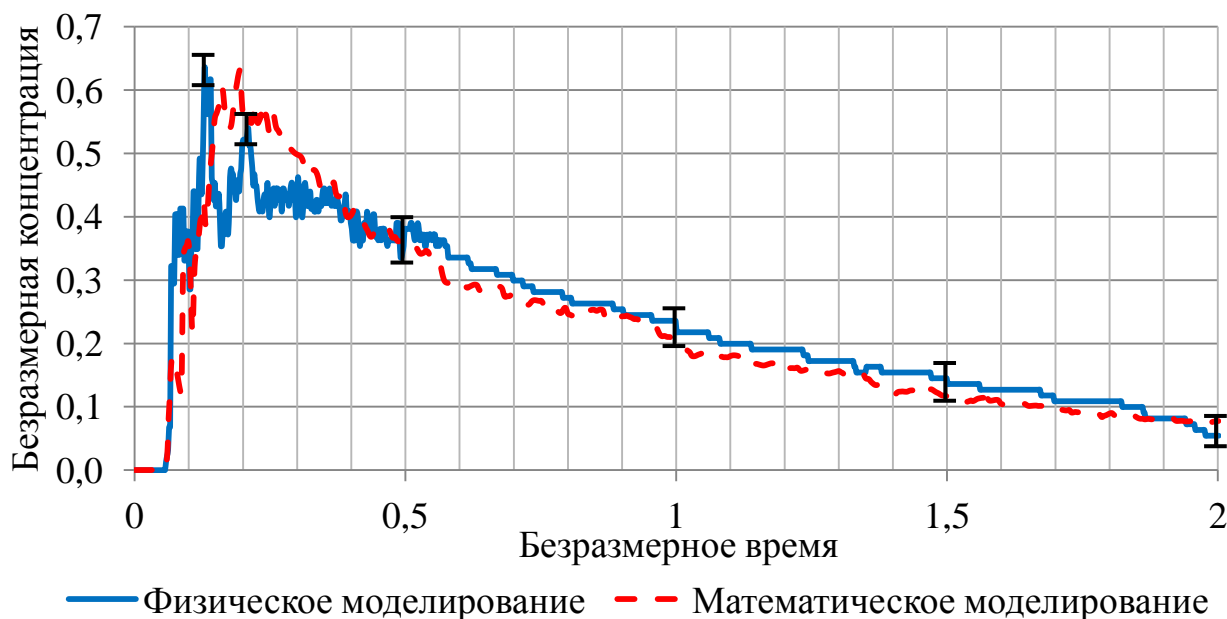


Рисунок 3.23 – Кривая распределения времени пребывания моделирующей жидкости в промежуточном ковше при использовании порогов (вариант Б)

Анализ результатов физического и математического моделирования гидродинамических процессов в промежуточном ковше оборудованном, порогами различной конфигурации позволяет сделать вывод о том, что использование порогов способствует увеличению минимального времени достижения потока жидкости разливочных стаканов по сравнению с базовым вариантом и приводит к снижению объема застойных зон.

3.3 Исследование гидродинамических процессов в промежуточном ковше оборудованном струегасителем

В настоящее время предприятия, занимающиеся производством огнеупорных материалов для сталеплавильного производства в целом и непрерывной разливки в частности, предлагают для организации движения металла в промежуточном ковше различные варианты струегасителей для приема струи из сталеразливочного ковша, при этом эффективность их использования зависит от формы промежуточного ковша, количества разливочных стаканов и конкретных геометрических параметров внутреннего пространства.

Для оценки эффективности струегасителей различной конфигурации (рисунок 3.24, таблица 3.4) и возможности их использования для условий разливки металла на блюмовой МНЛЗ АО «ЕВРАЗ ЗСМК» проведены лабораторные исследования [187-189].

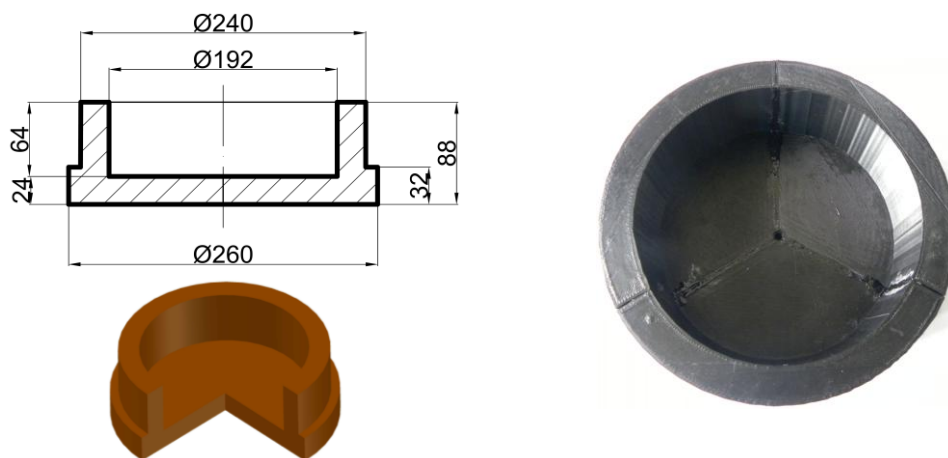


Рисунок 3.24 – Модель струегасителя для приема струи металла из сталеразливочного ковша

Таблица 3.4 – Варианты конфигурации струегасителя в зависимости от отношения высоты к диаметру

Вариант конфигурации	Высота (H), мм	Диаметр (D), мм	H/D
А	64	192	0,33
Б	80	192	0,42
В	96	192	0,50
Г	112	192	0,58
Д	128	192	0,67

Исследование гидродинамических процессов в промежуточном ковше с использованием различных вариантов конфигурации струегасителей осуществлялось при их установке по оси падения струи моделирующей жидкости, согласно схеме (рисунок 3.25).

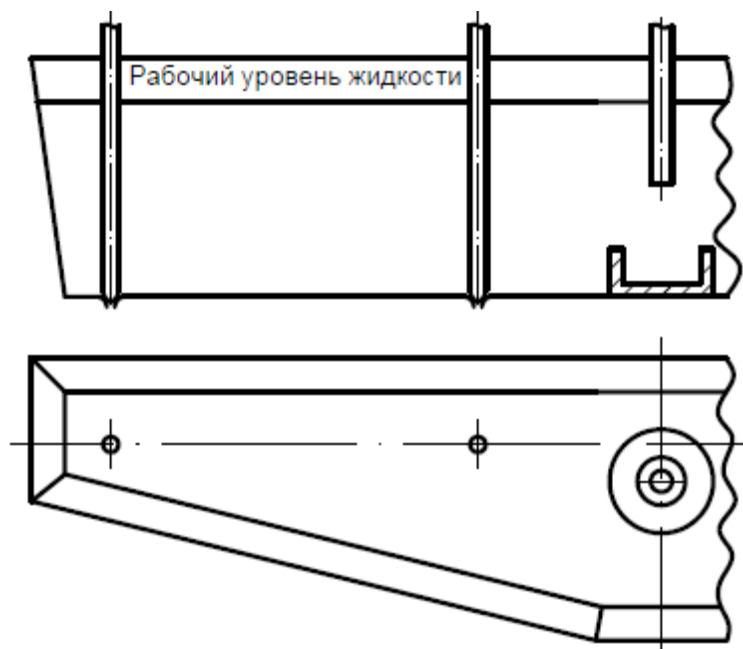


Рисунок 3.25 – Схема расположения струегасителей в промежуточном ковше

Сравнительные результаты физического и математического моделирования гидродинамических процессов в промежуточном ковше при использовании струегасителей различной конфигурации по минимальному времени достижения порции модельной жидкости центральных и периферийных разливающих стаканов и объему застойных зон представлены на рисунках 3.26, 3.27.

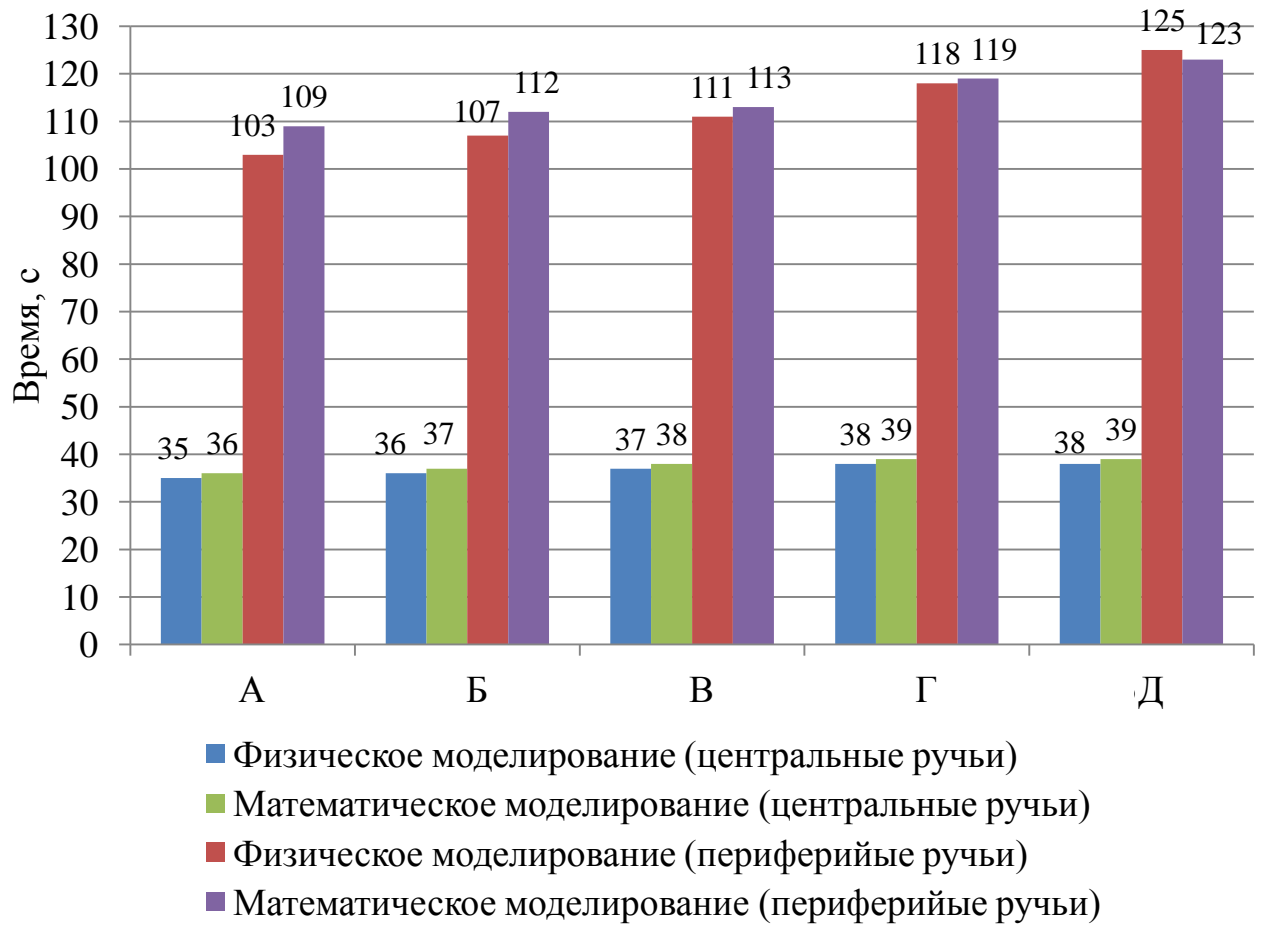


Рисунок 3.26 – Минимальное время достижения потока разливочных стаканов при использовании различных вариантов конфигурации струегасителей

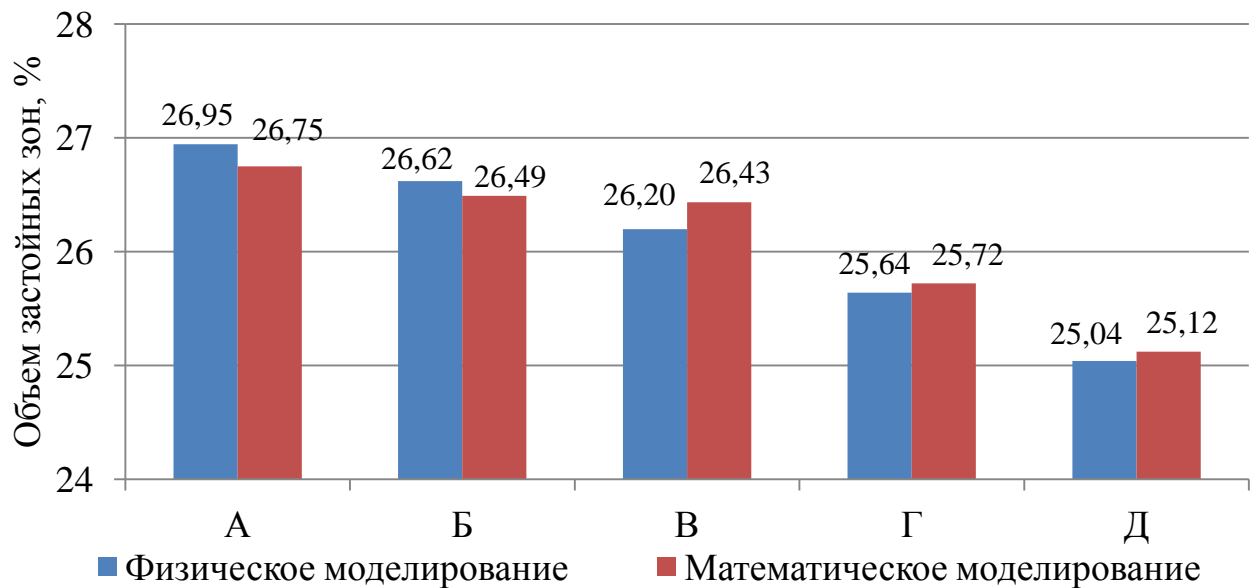


Рисунок 3.27 – Объём застойных зон промежуточного ковша при использовании струегасителей различных вариантов конфигурации, %

Сравнение отношения минимального времени достижения потока моделирующей жидкости разливочных стаканов к высоте струегасителя при физическом и математическом моделировании представлены на рисунке 3.28.

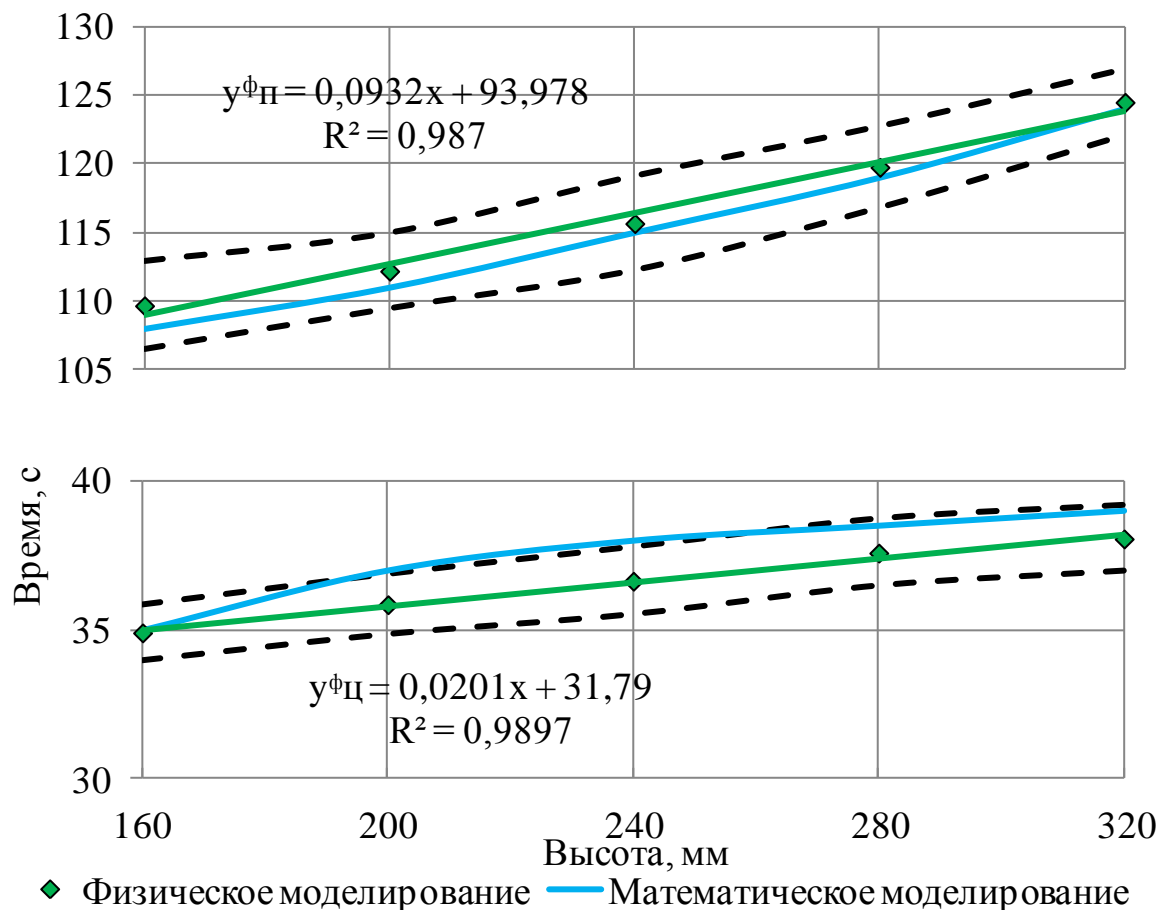


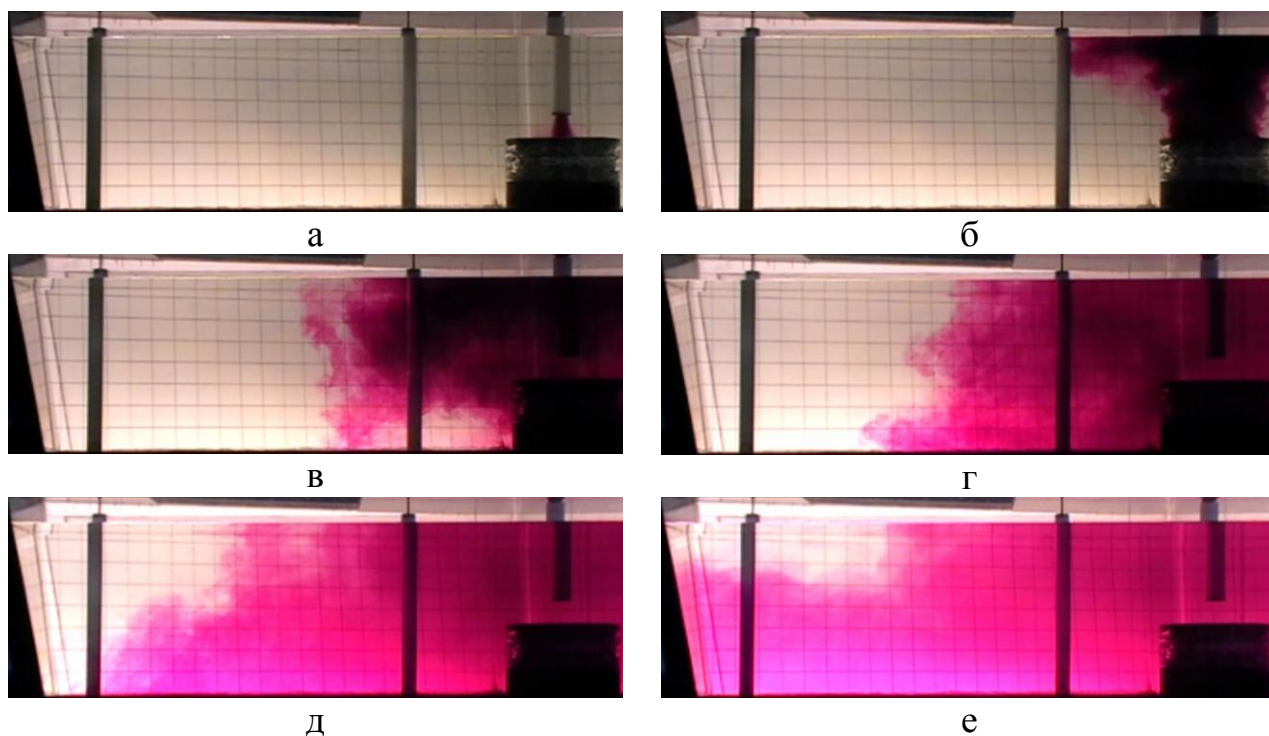
Рисунок 3.28 – Отношение минимального времени достижения потока моделирующей жидкости разливочных стаканов к высоте струегасителя при физическом и математическом моделировании

Основные характеристики кривых распределения времени пребывания жидкости в объеме промежуточного ковша при использовании струегасителей различных вариантов представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Основные характеристики кривой распределения времени пребывания моделирующей жидкости в объеме промежуточного ковша при использовании струегасителей различной конфигурации

Вариант конфигурации перегородок	Основные характеристики								
	t _{min} , с	t _{max} , с	t _{ср} , с	θ _{min} , ед.	θ _{max} , ед.	θ _{ср} , ед.	V _p , %	V _m , %	V _d , %
Физическое моделирование (в пересчете на реальный объект)									
Вариант А	69	101	843,6	0,082	0,119	0,731	10,027	63,028	26,945
Вариант Б	71,5	103		0,084	0,122	0,7338	10,3	63,08	26,62
Вариант В	74	106		0,088	0,126	0,738	10,7	63,103	26,197
Вариант Г	78	111,4		0,092	0,1318	0,7436	11,19	63,17	25,64
Вариант Д	81,5	115,3		0,096	0,1364	0,75	11,62	63,339	25,04
Математическое моделирование									
Вариант А	72,5	99,5	843,6	0,086	0,118	0,733	10,217	63,033	26,75
Вариант Б	74,5	101		0,088	0,121	0,735	10,44	63,07	26,49
Вариант В	75,5	102		0,089	0,121	0,736	10,487	63,079	26,434
Вариант Г	79	108		0,094	0,128	0,743	11,12	63,16	25,72
Вариант Д	81	115		0,095	0,136	0,749	11,558	63,322	25,12
Отклонение результатов моделирования, %									
Вариант А	5,07	1,49	-	4,88	0,17	0,21	1,89	0,01	0,72
Вариант Б	4,20	1,94		4,76	0,98	0,18	1,36	0,02	0,49
Вариант В	2,03	3,77		1,14	4,17	0,32	1,99	0,04	0,90
Вариант Г	1,28	3,05		2,17	2,58	0,11	0,63	0,02	0,31
Вариант Д	0,61	0,26		1,04	0,29	0,16	0,53	0,03	0,32

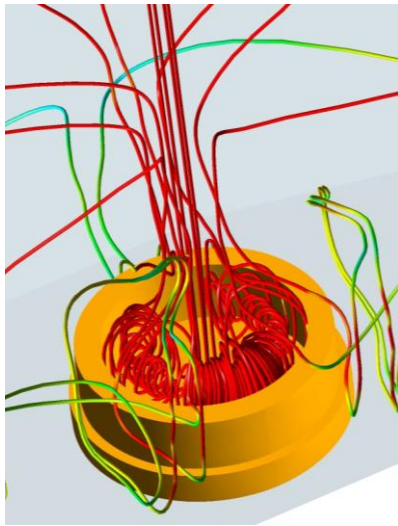
При анализе результатов физического и математического гидродинамических процессов в промежуточном ковше с использованием струегасителей различной конфигурации (рисунки 3.26-3.28 и таблица 3.5) установлено, что с увеличением высоты струегасителя минимальное время достижения потока моделирующей жидкости разливочных стаканов возрастает, при этом конфигурация струегасителя варианта Д является наиболее рациональной, а гидродинамическая картина в промежуточном ковше при его использовании принимает следующий вид (рисунок 3.29).



а – через 2 с.; б – через 14 с.; в – через 38 с.; г – через 63 с.;
д – через 125 с.; е – через 230 с.

Рисунок 3.29 – Гидродинамическая картина в промежуточном ковше с использованием струегасителя с прямыми стенками без верхней части (вариант Д)

При попадании потока расплава в объем струегасителя происходит подавление части энергии струи за счет циркуляции, после чего поток направляется к поверхности, отражается и направляется к центральным и периферийным разливочным стаканам, достигая их 38 и 125 с эксперимента, соответственно (рисунок 3.29). В результате циркуляции в ограниченном объеме (рисунок 3.30) скорость гидропотоков в объеме промежуточного ковша снижается с 0,45 -0,50 м/с до 0,2-0,25 м/с (рисунок 3.31). При выходе из объема струегасителя основной поток направляется к поверхности, при этом скорость потоков у поверхности над струегасителем и в области защитной трубы достигает 0,10-0,15 м/с (рисунки 3.32, 3.33).



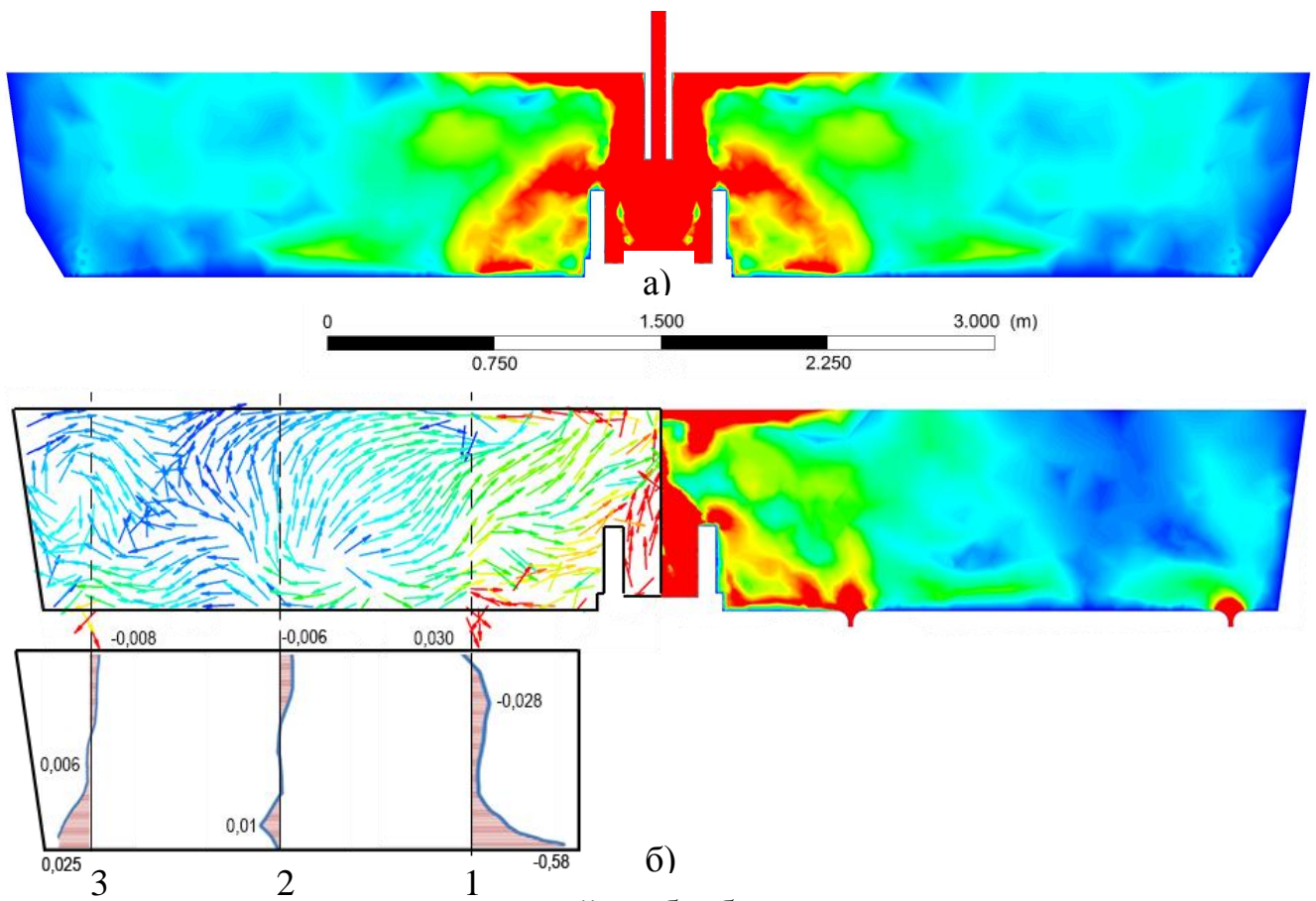
а



б

а – математическое моделирование; б – физическое моделирование

Рисунок 3.30 – Сравнение гидродинамических процессов в объеме струегасителя при физическом и математическом моделировании



а – продольное сечение по защитной трубе; б – продольное сечение по стопорам

Рисунок 3.31 – Контурная карта результирующей скорости движения расплава параллельно плоскости XOY при использовании струегасителя (вариант Д)

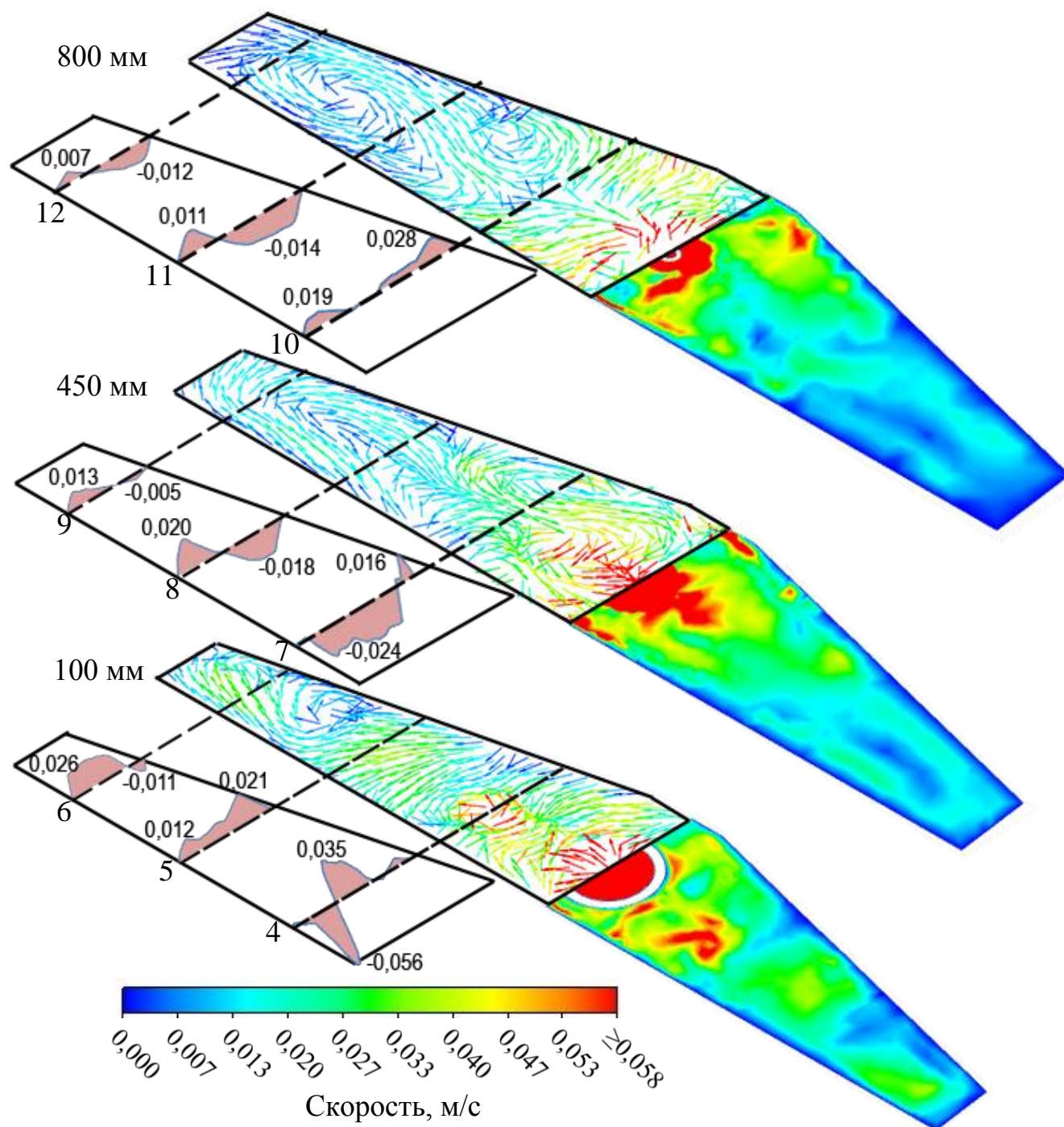
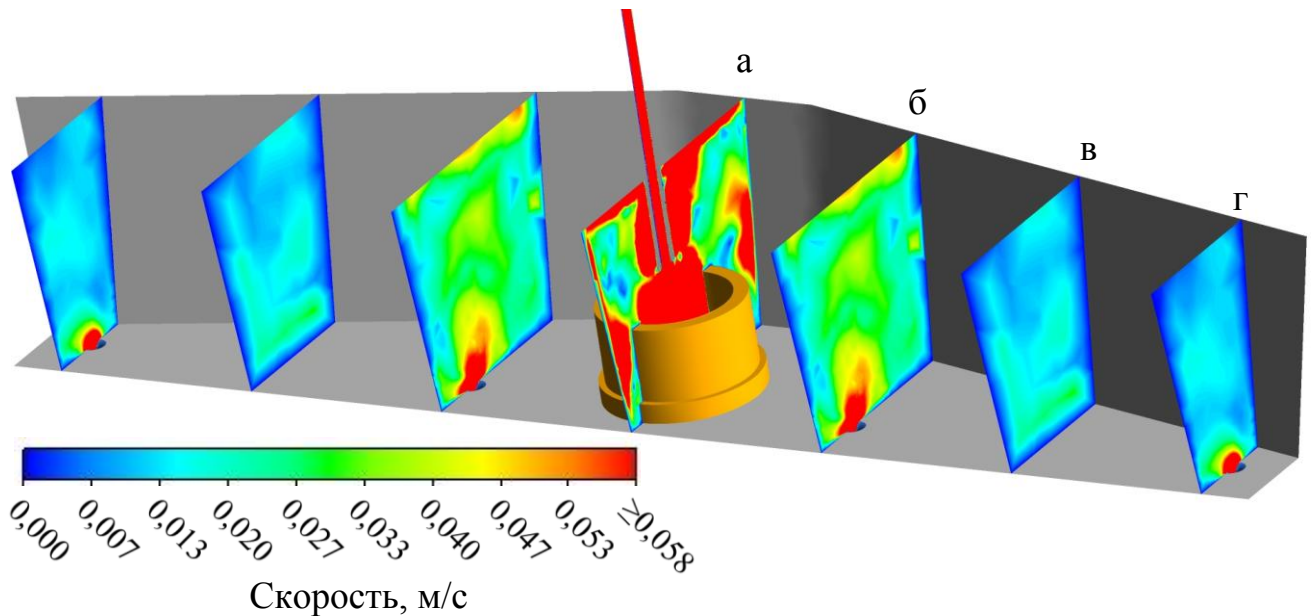


Рисунок 3.32 – Контурная карта результирующей скорости движения расплава в отдельных сечения промежуточного ковша относительно дна при установке струегасителя (вариант Д)

Основной поток, достигая поверхности, разделяется на части, одна – отраженная от поверхности часть ниспадает и устремляется частично к периферийным и к центральным разливочным стаканам промежуточного ковша,

формируя обратные потоки, скорость которых в средних слоях (450 мм от дна) достигает 0,024 м/с (рисунок 3.32, эпюра 7), при этом в придонных слоях (100 мм от дна) вблизи центрального разливочного стакана данный поток соединяется с потоками отраженными от передней и задней стенок промежуточного ковша образуя вихревую область с прямыми и обратными потоками, достигающими значений скорости 0,035 и 0,056 м/с, соответственно (рисунок 3.32, эпюра 4).



а – поперечное сечение по оси защитной трубы; б – поперечное сечение по оси центральных разливочных стаканов; в – поперечное сечение на расстоянии 1700 мм от оси защитной трубы; г – поперечное сечение по оси периферийных разливочных стаканов

Рисунок 3.33 – Контурная карта результирующей скорости движения расплава в поперечных сечениях промежуточного ковша относительно оси защитной трубы при использовании струегасителя (вариант Д)

Вторая часть основного потока продолжает движение вдоль поверхности, при этом скорость вблизи задней стенки в области центральных разливочных стаканов достигает 0,028 м/с, а передней 0,019 м/с (рисунок 3.32, эпюра 10). На расстоянии 1700 мм от оси защитной трубы поток переходит в средние слои частично формируя обратные потоки, скорость которых на расстоянии 800 мм от дна составляет 0,014 м/с (рисунок 3.32, эпюра 11), а в средних и нижних 0,018

и 0,021 м/с (рисунок 3.32, эпюры 8, 5). Вдоль оси периферийного разливочного стакана у поверхности скорость потоков прямых и обратных потоков достигает 0,007 и 0,012 м/с соответственно (рисунок 3.32, эпюра 12), а в придонных (на расстоянии 100 мм от дна) происходит затягивание потока в разливочный стакан, скорость при этом возрастает до 0,026 м/с.

Из траектории движения потоков расплава (рисунки 3.34, 3.35) и полей скоростей (рисунки 3.28-3.30) видно, что в области между разливочными стаканами, в области периферийных разливочных стаканов и у торцевых стенок наблюдаются застойные низкоскоростные зоны.

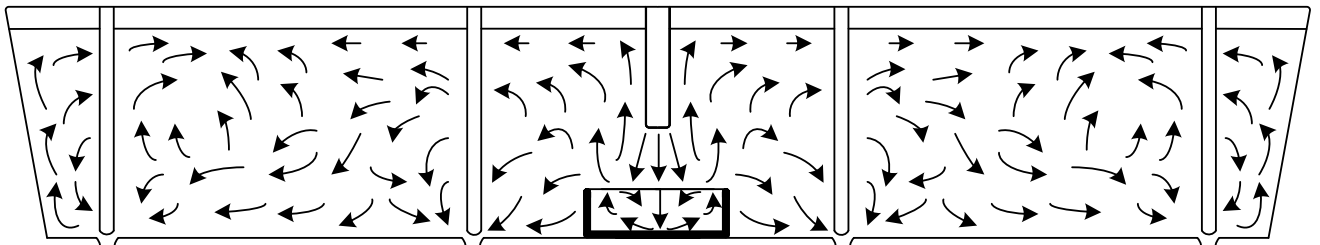


Рисунок 3.34– Схема распределения потоков моделирующей жидкости в промежуточном ковше с использованием струегасителя

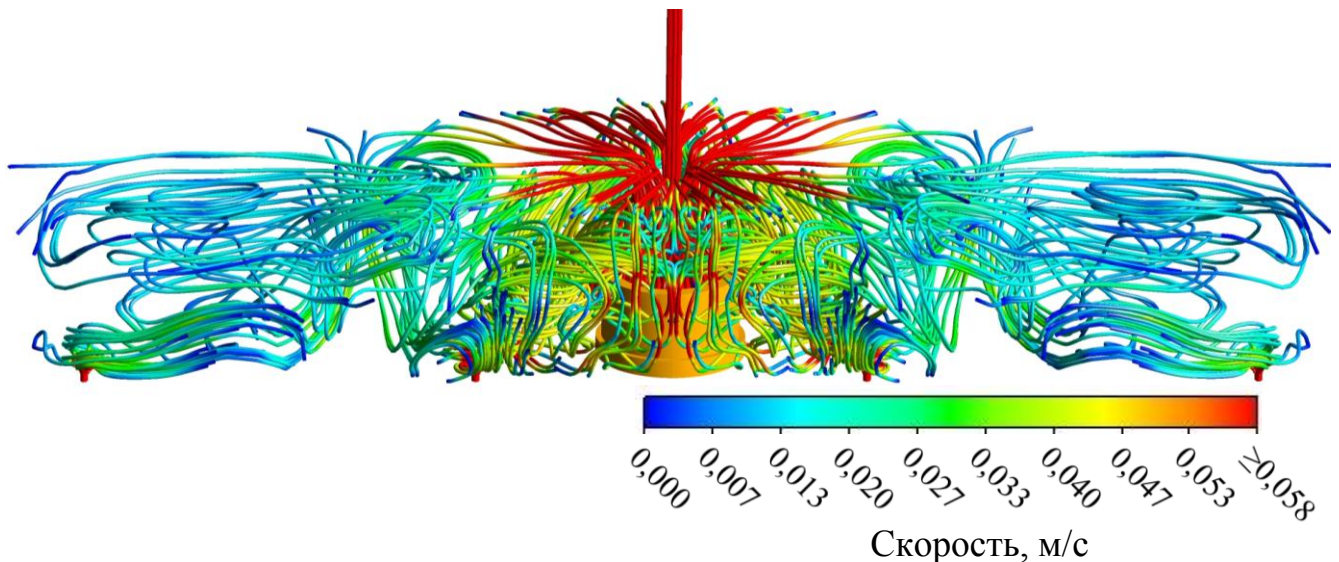


Рисунок 3.35 – Линии движения потоков металла в промежуточном ковше при использовании струегасителя (вариант Д)

Анализ данных, полученных кондуктометрическим методом, представленный на рисунке 3.36, подтвердил минимальное время достижения жидкости центральных и периферийных разливочных стаканов промежуточного ковша – 38 и 125 с соответственно.

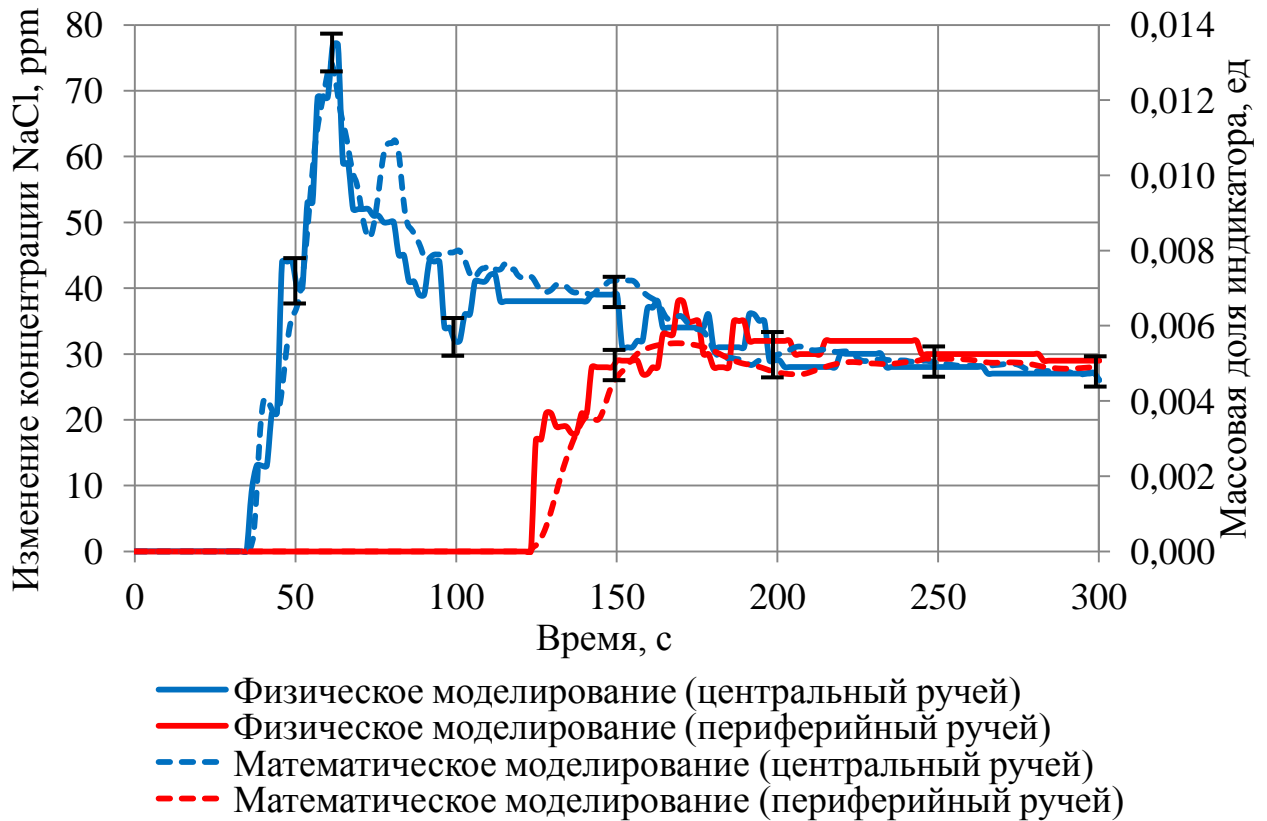


Рисунок 3.36 – Изменение концентрации индикатора по ходу процесса при использовании в промежуточном ковше струегасителя (вариант Д)

Распределение частиц NaCl в объеме ковша (рисунок 3.36), оборудованного струегасителем, более равномерно по сравнению с базовым вариантом. Однако в данном случае также наблюдаются пиковые значения, что свидетельствует о недостаточной гомогенизации жидкости. Пик концентрации соли на центральном датчике наблюдается 62 с после чего концентрация соли в воде понижается. На периферийном датчике, наблюдаются несколько пиковых значений, первый пики концентрации приходится на 169 с эксперимента.

Кривая распределения времени пребывания жидкости в промежуточном ковше при использовании струегасителя (вариант Д) примет следующий вид (рисунок 3.37).

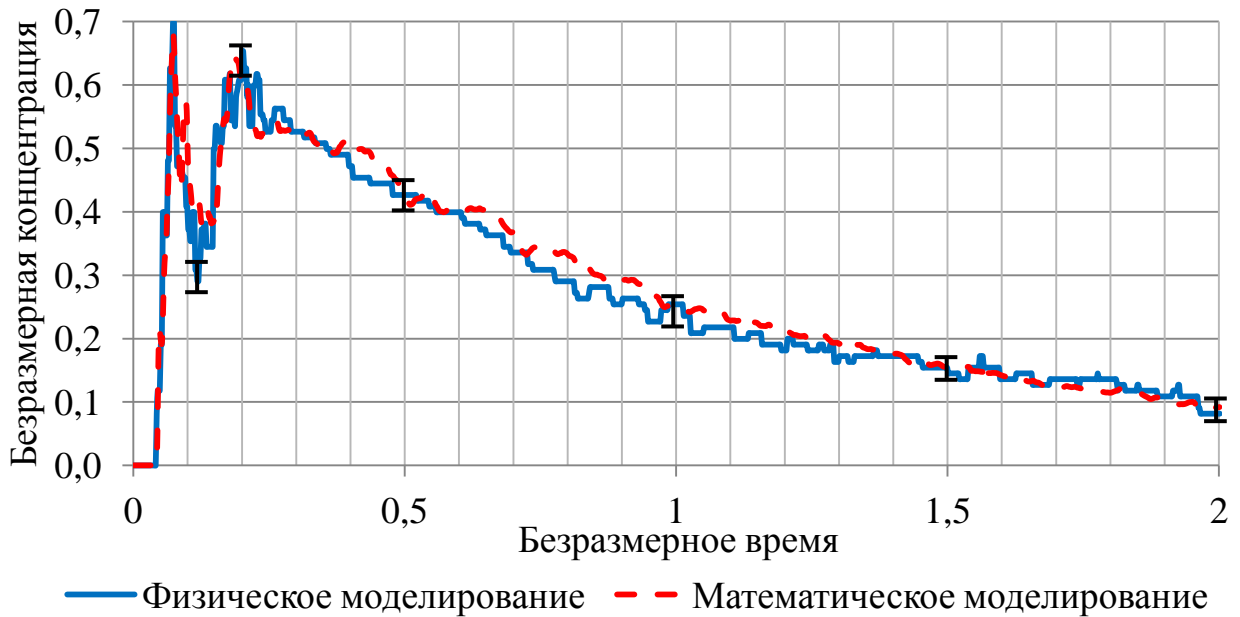


Рисунок 3.37 – Кривая распределения времени пребывания моделирующей жидкости в промежуточном ковше при использовании струегасителя (вариант Д)

При использовании струегасителя в промежуточном ковше наблюдается уменьшение области с активными завихрениями, снижение турбулентности и, как следствие, увеличение минимального времени пребывания порции металла в промежуточном ковше. В реальных условиях перемещение металла вблизи поверхности раздела металл-шлак способствует поглощению неметаллических включений шлаковым расплавом, так как расстояние до шлакового покрытия для частиц включений значительно сокращается. В ходе экспериментов было установлено, время контакта основного потока металла с покровным шлаком ограничено. Как и в промежуточном ковше базовой конструкции здесь наблюдали возникновение придонного потока в зоне активной циркуляции ограниченной области между защитными трубами и образование «застойных» зон у торцевых стенок промежуточного ковша. При этом скорость движения придонного потока значительно ниже скорости основного.

Анализ результатов физического моделирования в промежуточном ковше при использовании струегасителей различных вариантов конфигурации позволяет сделать вывод о том, что минимальное значения объема застойных зон достигается при использовании варианта конфигурации Д и составляет ~25 %.

3.4 Исследование гидродинамических процессов в многокамерном промежуточном ковше

Разделение внутреннего объема промежуточного ковша на отдельные камеры – приемную и разливочные, позволяет обеспечить в каждой камере необходимые гидродинамические условия. В приемной камере осуществляется прием струи металла из сталеразливочного ковша и снижение ее кинетической энергии, в разливочных – возможно создание условий, благоприятных для рафинирования металлического расплава. Разделение внутреннего объема промежуточного ковша производится установкой огнеупорных перегородок. Из приемной камеры металл через отверстия в перегородках направляется в разливочные камеры. Для направления потоков металлического расплава к поверхности раздела «металл-шлак» отверстия в перегородках выполняются под наклоном к горизонтальной плоскости.

Размер отверстий в перегородках влияет на гидродинамическую картину в разливочных камерах, и, соответственно, на условия рафинирования расплава. Для определения оптимального диапазона общей площади отверстий в перегородках провели экспериментальные исследования методами физического и компьютерного моделирования.

Конструктивные особенности промежуточного ковша МНЛЗ № 1 электросталеплавильного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК» ограничены в возможных вариантах установки полнопрофильных перегородок. Для условий моделирования на физической модели промежуточного ковша модели огнеупорных перегородок (рисунок 3.38) устанавливали на расстоянии 144 мм от оси модели защитной трубы (рисунок 3.39) [187-189].

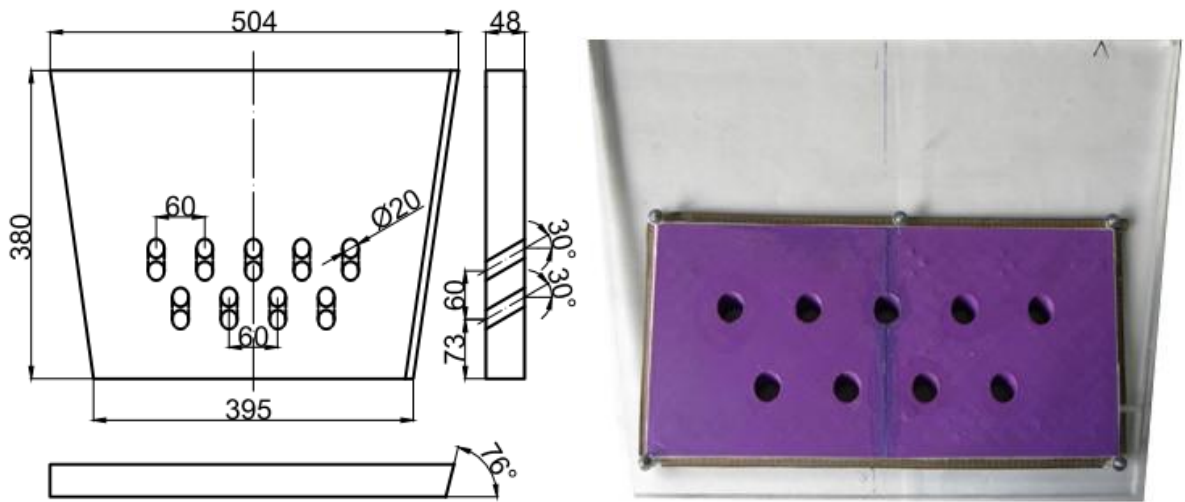


Рисунок 3.38 – Модель полнопрофильной перегородки для разделения объема промежуточного ковша

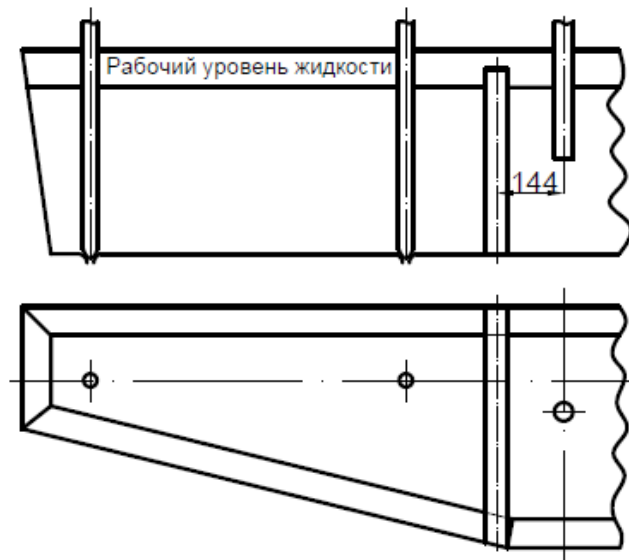


Рисунок 3.39– Схема расположения моделей перегородок в модели промежуточном ковше

При проведении экспериментальных исследований были использованы различные конструктивные варианты полнопрофильных перегородок (в пересчете на реальный объект):

А) суммарная площадь сечения отверстий 17671 мм^2 , диаметр 5 отверстий верхнего ряда 50 мм и 4 отверстий нижнего – 50 мм;

Б) суммарная площадь сечения отверстий 32987 мм^2 , диаметр 5 отверстий верхнего ряда 80 мм и 4 отверстий нижнего – 50 мм;

В) суммарная площадь сечения отверстий 59376 мм^2 , диаметр 5 отверстий верхнего ряда 100 мм и 4 отверстий нижнего – 80 мм;

Г) суммарная площадь сечения отверстий 46496 мм², диаметр 4 отверстий верхнего ряда 100 мм и 3 отверстий нижнего – 80 мм;

Д) суммарная площадь сечения отверстий 37306 мм², диаметр 4 отверстий верхнего ряда 100 мм и 3 отверстий нижнего – 50 мм;

Е) суммарная площадь сечения отверстий 25997 мм², диаметр 4 отверстий верхнего ряда 80 мм и 3 отверстий нижнего – 50 мм.

Угол наклона отверстий к горизонтальной плоскости для всех вариантов исследования составляет 30°, что обеспечивает направленное движение потоков расплава без нарушения шлакового покрова.

Сравнительные результаты физического и математического моделирования гидродинамических процессов в промежуточном ковше при использовании полнопрофильных перегородок различной конфигурации по минимальному времени достижения порции модельной жидкости центральных и периферийных разливочных стаканов и объему застойных зон представлены на рисунках 3.40, 3.41.

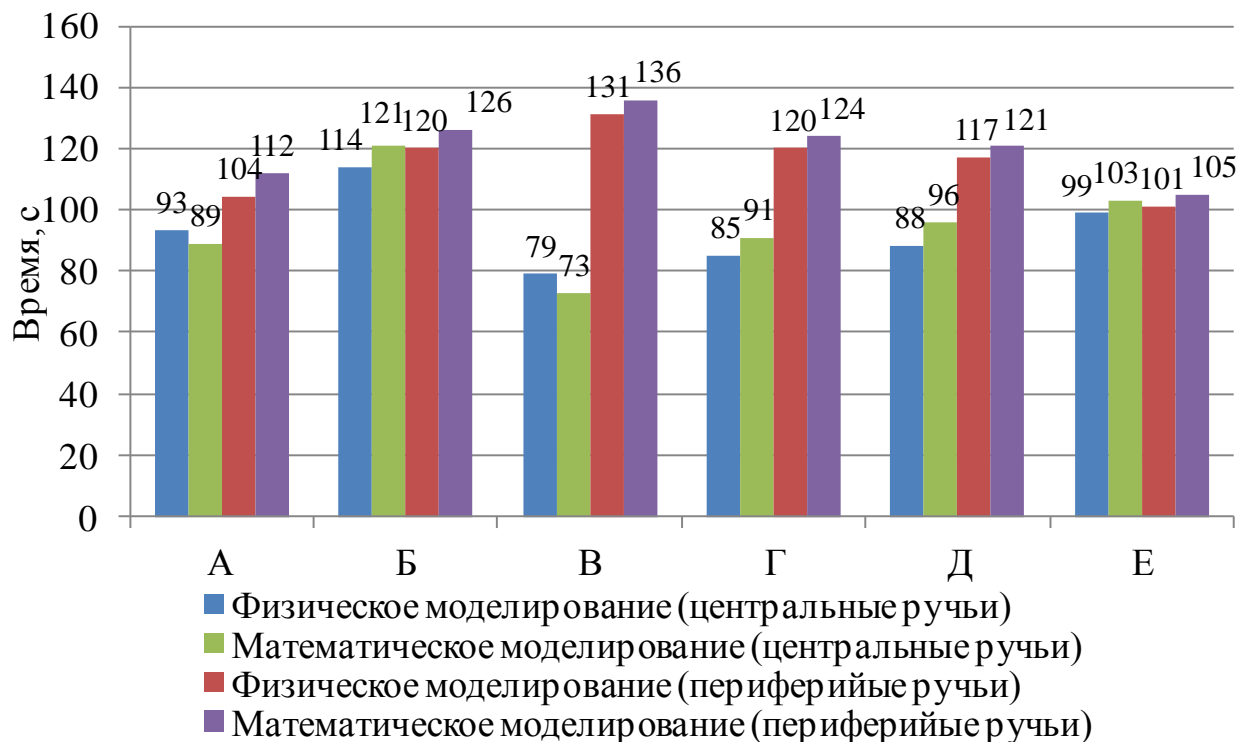


Рисунок 3.40 – Минимальное время достижения потока разливочных стаканов при использовании различных вариантов конфигурации перегородок

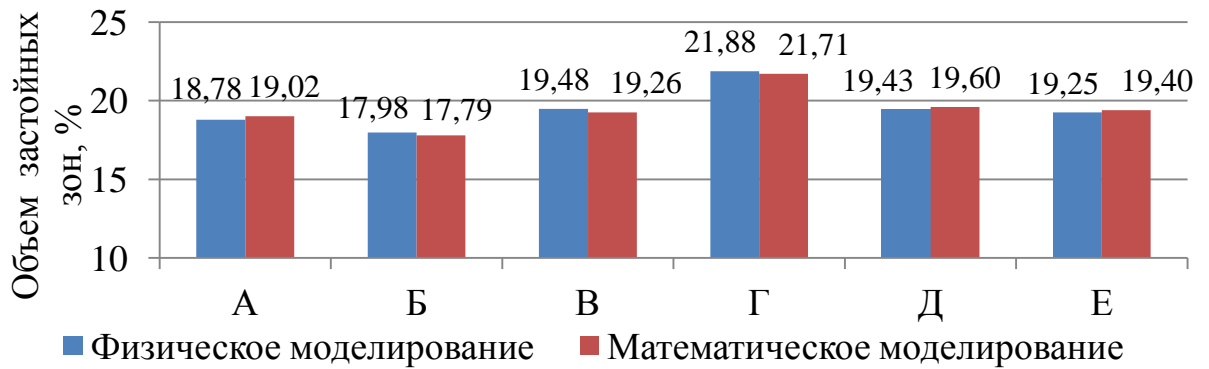


Рисунок 3.41 – Объём застойных зон промежуточного ковша при использовании полнопрофильных перегородок различных вариантов конфигурации, %

Сравнение отношения минимального времени достижения порции жидкости разливочных стаканов к площади живого сечения отверстий полнопрофильных перегородок при физическом и математическом моделировании представлено на рисунке 3.42.

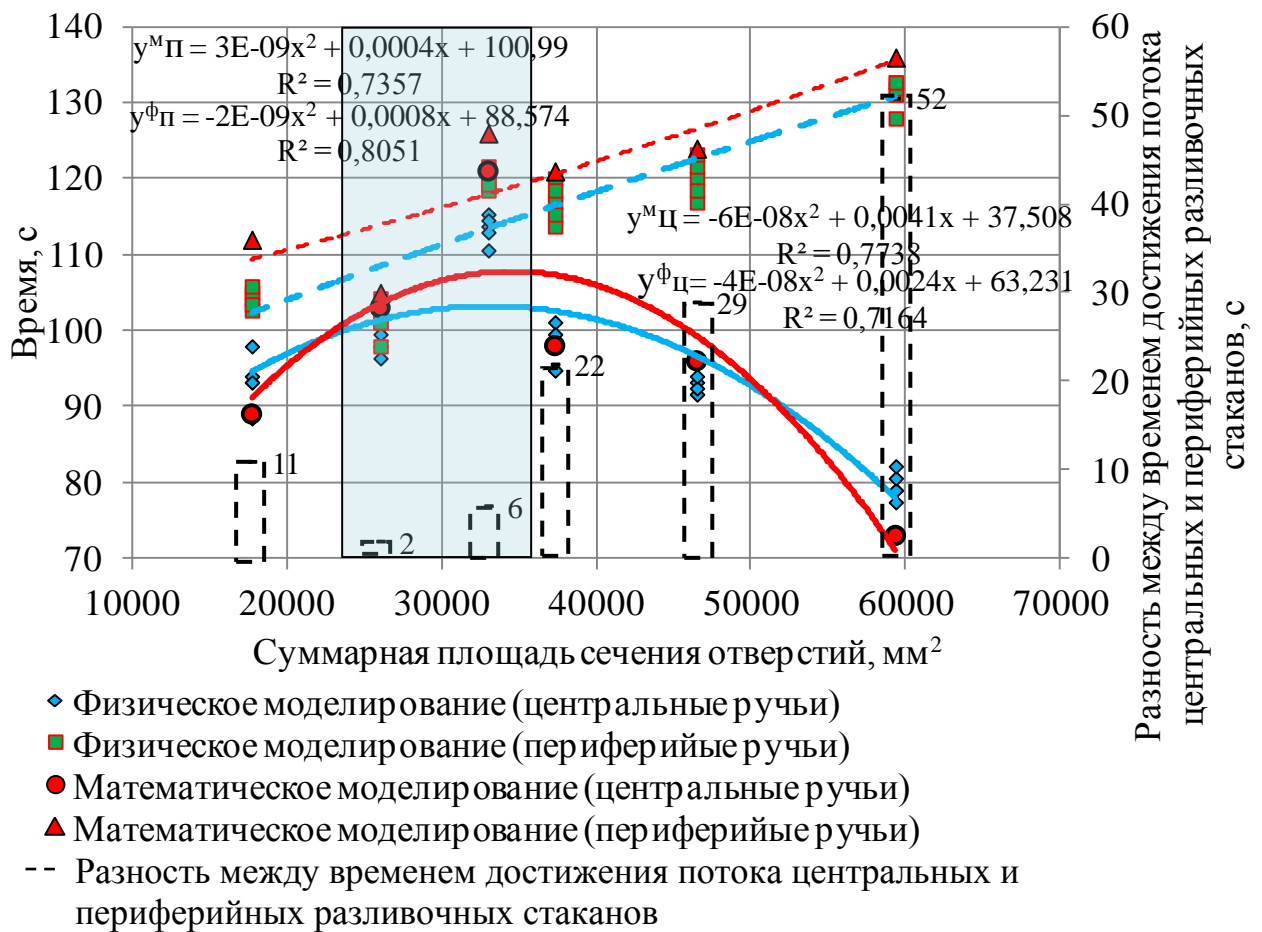


Рисунок 3.42 – Сравнение отношения минимального времени достижения порции жидкости разливочных стаканов к площади живого сечения отверстий перегородок при физическом и математическом моделировании

Основные характеристики кривой распределения времени пребывания жидкости в объеме промежуточного ковша при использовании полнопрофильных перегородок различных вариантов конфигурации представлены в таблице 3.6.

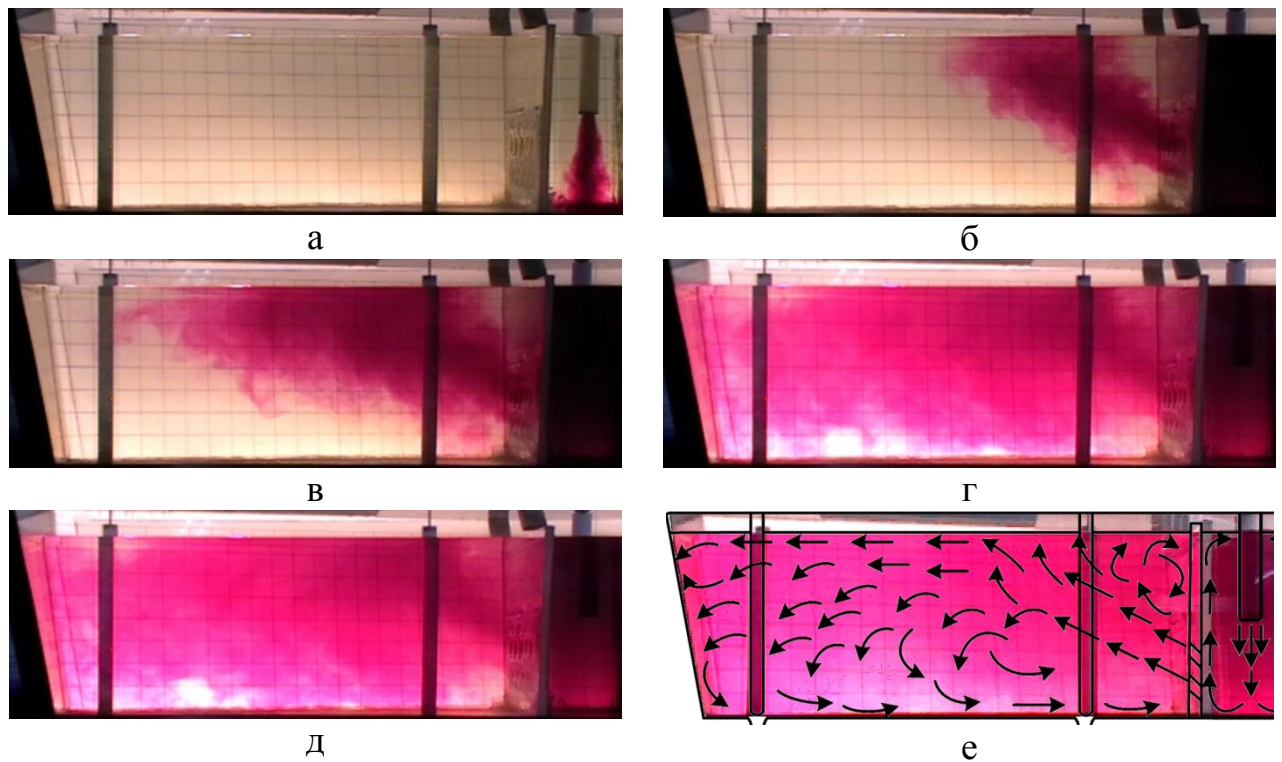
Таблица 3.6 – Основные характеристики кривой распределения времени пребывания жидкости в объеме промежуточного ковша при использовании полнопрофильных перегородок

Вариант конфигурации перегородок	Основные характеристики								
	t _{min} , с	t _{max} , с	t _{ср} , с	θ _{min} , ед.	θ _{max} , ед.	θ _{ср} , ед.	V _p , %	V _m , %	V _d , %
Физическое моделирование									
Вариант А	98,8	244,1	843,7	0,117	0,290	0,812	20,351	60,866	18,783
Вариант Б	116,9	233,1		0,139	0,276	0,82	20,758	61,261	17,981
Вариант В	105,1	227,5		0,125	0,270	0,805	19,766	60,754	19,48
Вариант Г	102,7	154,8		0,122	0,184	0,781	15,275	62,846	21,879
Вариант Д	102,7	192,0		0,122	0,228	0,806	17,524	63,042	19,434
Вариант Е	100,3	196,7		0,119	0,233	0,808	17,578	63,175	19,247
Математическое моделирование									
Вариант А	100,5	234,5	843,7	0,119	0,27768	0,81	19,834	61,146	19,02
Вариант Б	123,5	240,5		0,138	0,28518	0,822	21,159	61,049	17,792
Вариант В	104,5	215,5		0,124	0,25534	0,807	18,967	61,771	19,262
Вариант Г	107,5	154,5		0,129	0,18336	0,783	15,618	62,672	21,71
Вариант Д	108,5	180,5		0,13	0,20946	0,804	16,973	63,427	19,6
Вариант Е	104	183,5		0,123	0,21884	0,806	17,092	63,508	19,4
Отклонение результатов моделирования, %									
Вариант А	1,721	3,933	-	1,709	4,248	0,246	2,540	0,460	1,262
Вариант Б	5,646	3,175		0,719	3,326	0,244	1,932	0,346	1,051
Вариант В	0,571	5,275		0,800	5,430	0,248	4,042	1,674	1,119
Вариант Г	4,674	0,194		5,738	0,348	0,256	2,245	0,277	0,772
Вариант Д	5,648	5,990		6,557	8,132	0,248	3,144	0,611	0,854
Вариант Е	3,689	6,711		3,361	6,077	0,248	2,765	0,527	0,795

При анализе результатов физического и математического моделирования гидродинамических процессов в промежуточном ковше с использованием перегородок различной конфигурации (рисунки 3.40-3.42 и таблица 3.6) установлено, что конфигурация перегородок варианта Б является наиболее

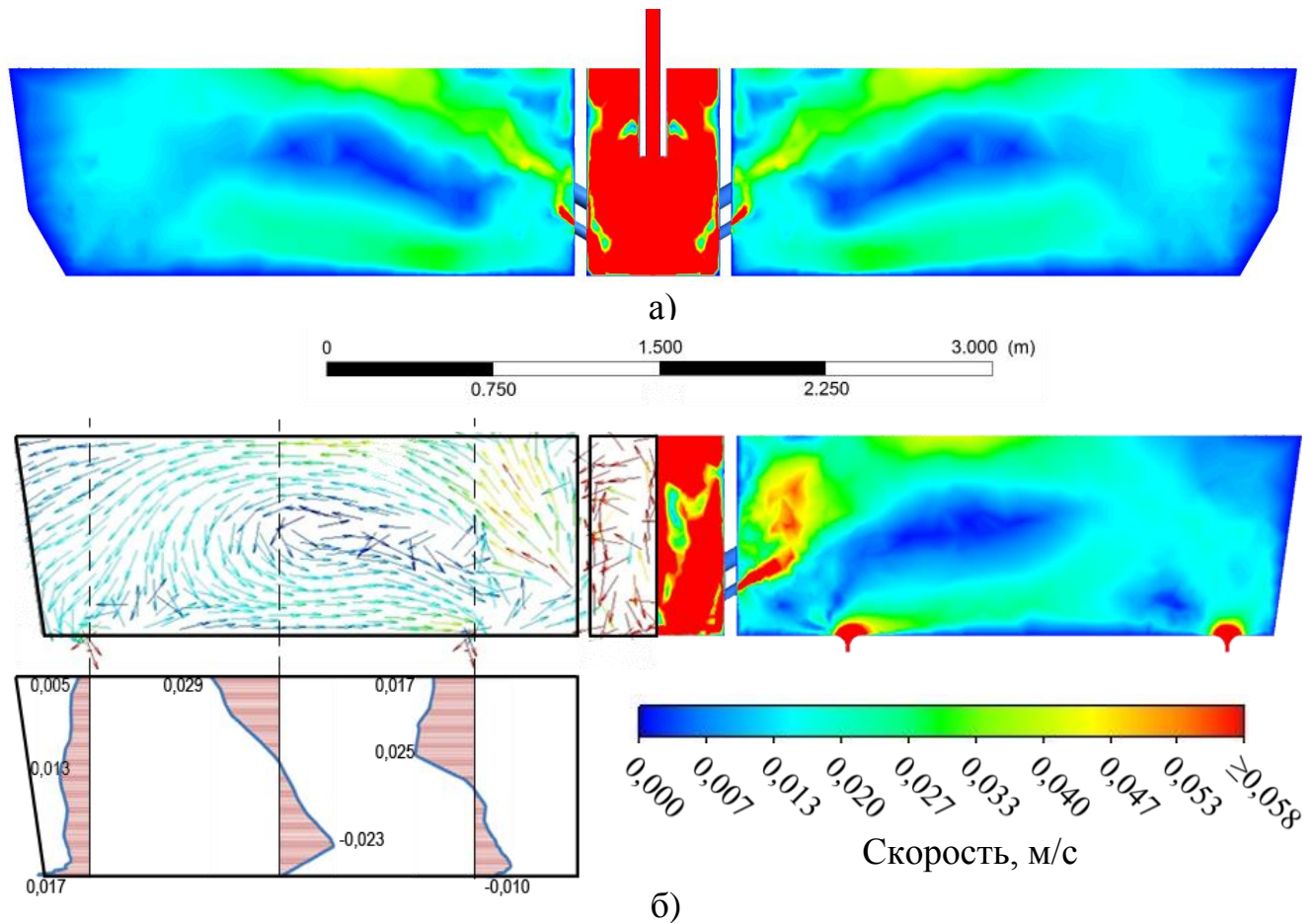
рациональной, при этом суммарная площадь отверстий 32987 мм^2 и их расположение обеспечивают достижение потоками моделирующей жидкости центральных и периферийных разливочных стаканов практически одновременно – 114 (121) с и 120 (126) с, соответственно и минимальное значение объема застойных зон $\sim 18 \%$. Скорость потоков у поверхности не превышает $0,029 \text{ м/с}$, что в промышленных условиях не приведет к размыванию шлака на границе раздела фаз металл-шлак.

Гидродинамическая картина в промежуточном ковше при установке полнопрофильных перегородок варианта Б, полученная методами физического и математического моделирования, представлена на рисунках 3.43-3.47.



а – через 2 с.; б – через 32 с.; в – через 63 с.; г – через 114 с.;
д – через 120 с.; е – через 142 с.

Рисунок 3.43 – Гидродинамическая картина в промежуточном ковше с использованием полнопрофильных перегородок (вариант Б)



а – продольное сечение по защитной трубе; б – продольное сечение по стопорам

Рисунок 3.44 – Контурная карта результирующей скорости движения расплава параллельно плоскости XOY при использовании перегородок (вариант Б)

Струи, проходящие через отверстия в перегородках, направляются к поверхности и достигают её в области центральной части между стопорами. При достижении поверхности происходит условное разделение основного потока на две части. Одна часть движется вдоль поверхности и, доходя до боковых стенок, устремляется к периферийным разливочным стаканам и далее, исходя из результатов компьютерного моделирования, движется с меньшей скоростью (рисунки 3.44-3.47) в придонных слоях вблизи задних стенок к центральным разливочным стаканам. Другая, отраженная от поверхности, часть основного потока направляется к центральному разливочному стакану. Время достижения потока центрального и периферийного разливочных стаканов составляет 114 и 120 с соответственно.

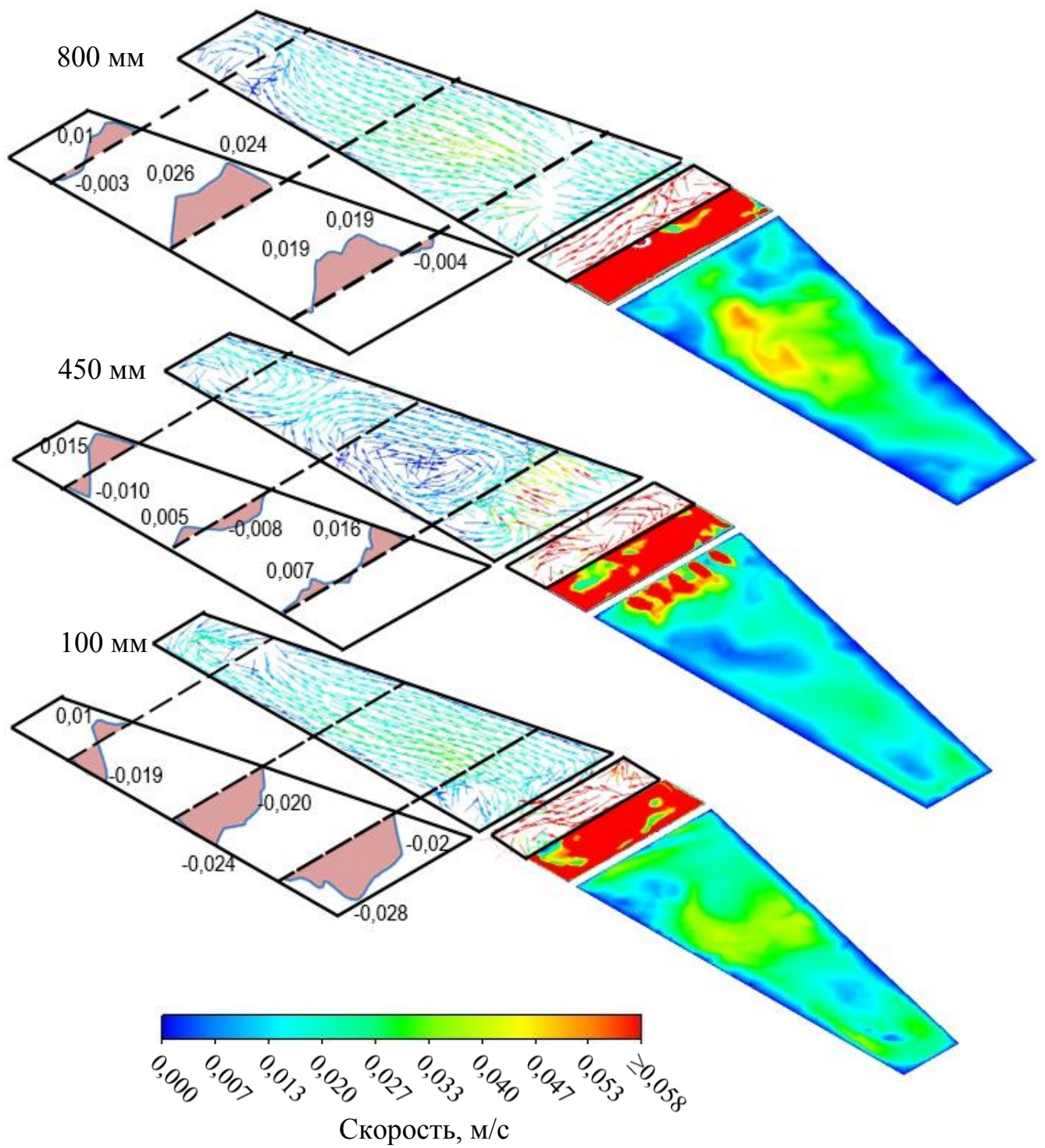
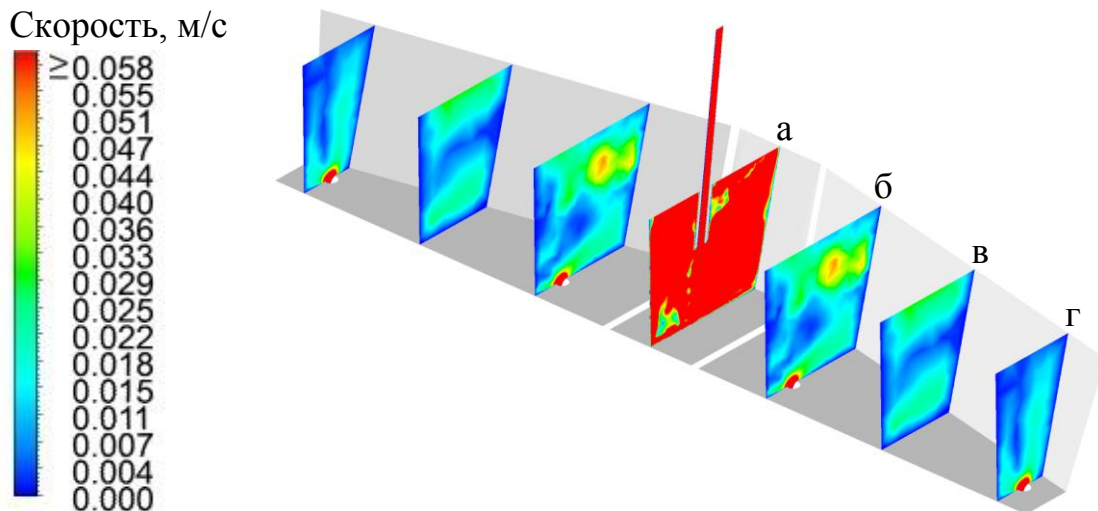


Рисунок 3.45 – Контурная карта результирующей скорости движения расплава в отдельных сечения промежуточного ковша относительно днища (с использованием перегородок, вариант Б)



а – поперечное сечение по оси защитной трубы; б – поперечное сечение по оси центральных разливочных стаканов; в – поперечное сечение на расстоянии 1700 мм от оси защитной трубы; г – поперечное сечение по оси периферийных разливочных стаканов

Рисунок 3.46 – Контурная карта результирующей скорости движения расплава в поперечных сечениях промежуточного ковша относительно оси защитной трубы при использовании перегородок (вариант Б)

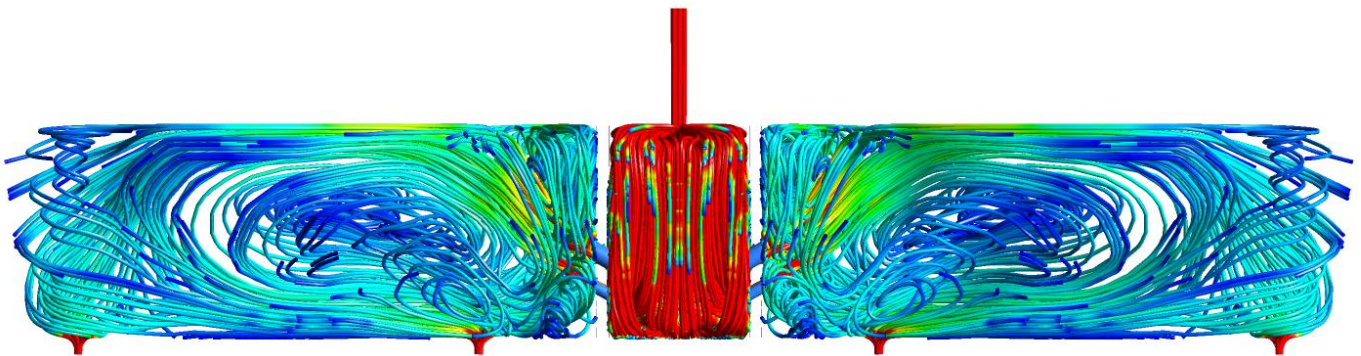


Рисунок 3.47 – Линии движения потоков металла в промежуточном ковше при использовании перегородок (вариант Б)

Анализ данных, полученных кондуктометрическим методом, представленный на рисунке 3.48, подтверждает минимальное время достижения потоков расплава центральных и периферийных разливочных стаканов промежуточного ковша – 114 и 120 с, соответственно.

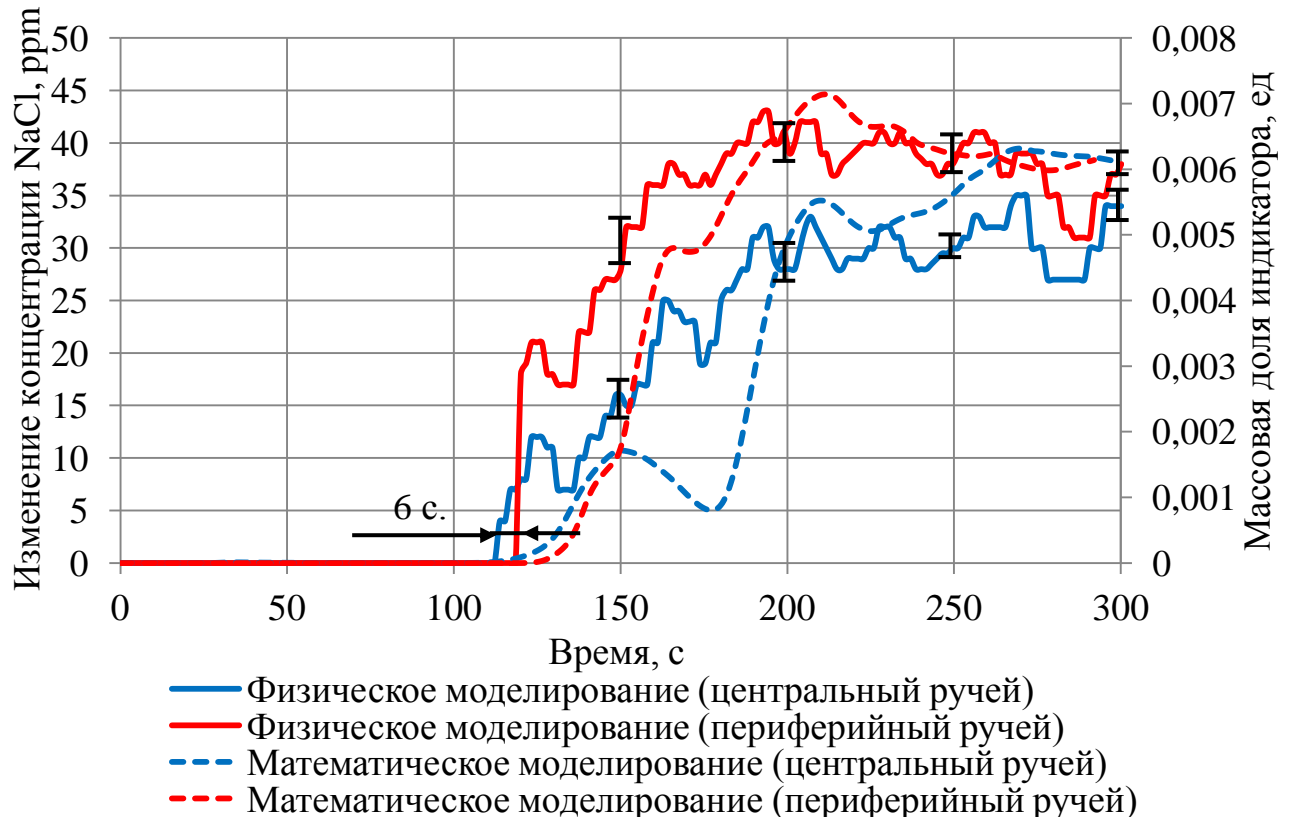


Рисунок 3.48 – Изменение концентрации NaCl по ходу процесса при использовании в промежуточном ковше полнопрофильных перегородок (вариант Б)

Из рисунка 3.48 видно, что разница по времени достижения порции жидкости центрального и периферийного ручьев составляет всего 6 с, при этом пики концентрации индикатора в моделирующей жидкости центрального и периферийного ручья идентичны, а к 316 с от начала эксперимента кривые концентрации пересекаются и практически сливаются в одну, что позволяет сделать вывод об эффективном перемешивании жидкости в объеме промежуточного ковша.

Кривая распределения времени пребывания жидкости в промежуточном ковше при использовании полнопрофильных перегородок (вариант Б) представлена на рисунке 3.49.

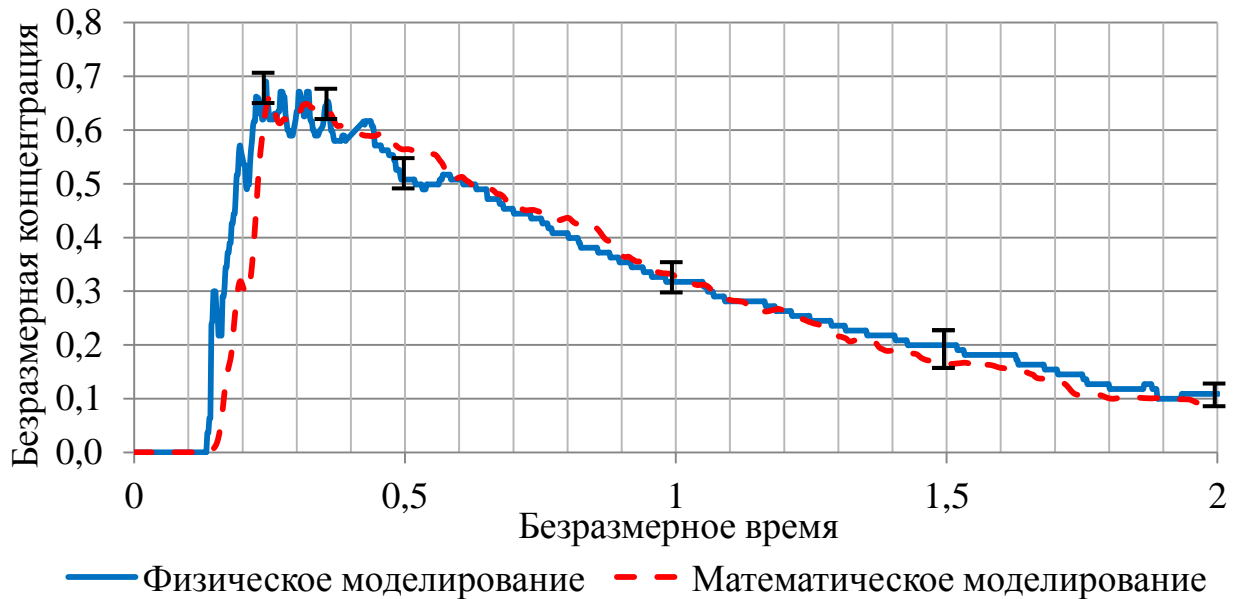


Рисунок 3.49 – Кривая распределения времени пребывания жидкости в промежуточном ковше при использовании перегородок (вариант Б)

При использовании полнопрофильных перегородок разработанной конструкции с суммарной площадью сечения отверстий 32987 мм^2 с двумя рядами отверстий (количество отверстий: верхнего ряда 5 шт, диам. 80 мм, нижнего ряда 4 шт, диам. 50 мм) создается замкнутый контур циркуляции, охватывающий практически весь объем промежуточного ковша. В промышленных условиях, при таком режиме течения расплава создаются благоприятные условия для рафинирования металла, в приемной камере происходит коагуляция и укрупнение неметаллических включений, а в разливочных – их перенос к ассимилирующему шлаковому расплаву.

Анализ результатов моделирования позволил установить зависимости объемов зон идеального вытеснения, идеального смешения и застойных от минимального времени достижения потока моделирующей жидкости разливочных стаканов (рисунки 3.50-3.52). Установлено, что с увеличением минимального времени достижения потока моделирующей жидкости разливочных стаканов объем зон идеального смешения возрастает, при этом объем зон идеального смешения и застойных зон снижается.

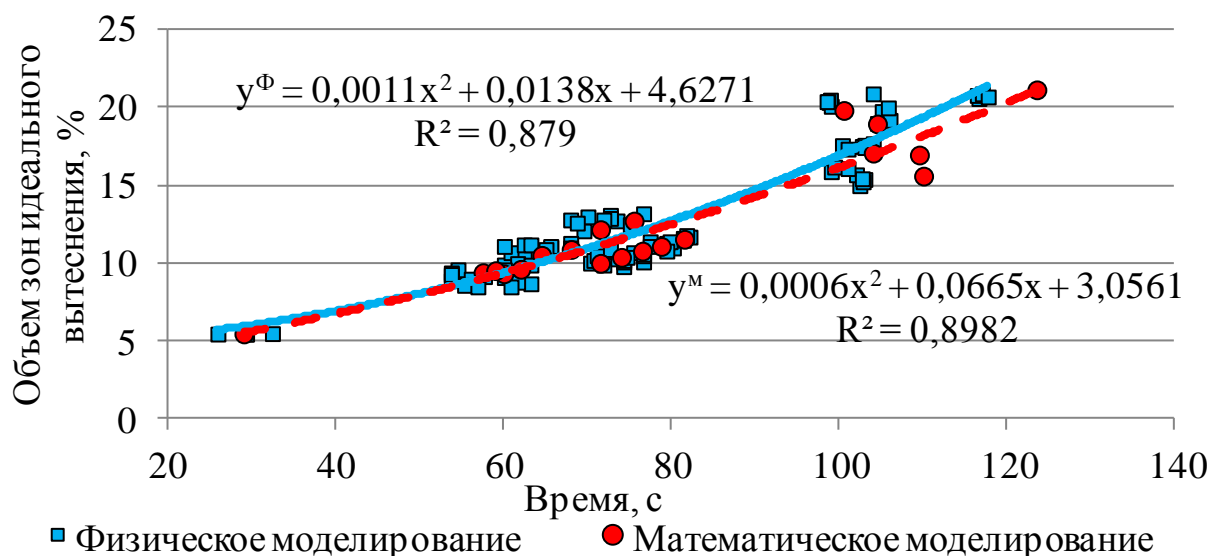


Рисунок 3.50 – Отношение объема зон идеального вытеснения к минимальному времени достижения потока моделирующей жидкости разливных стаканов при физическом и математическом моделировании

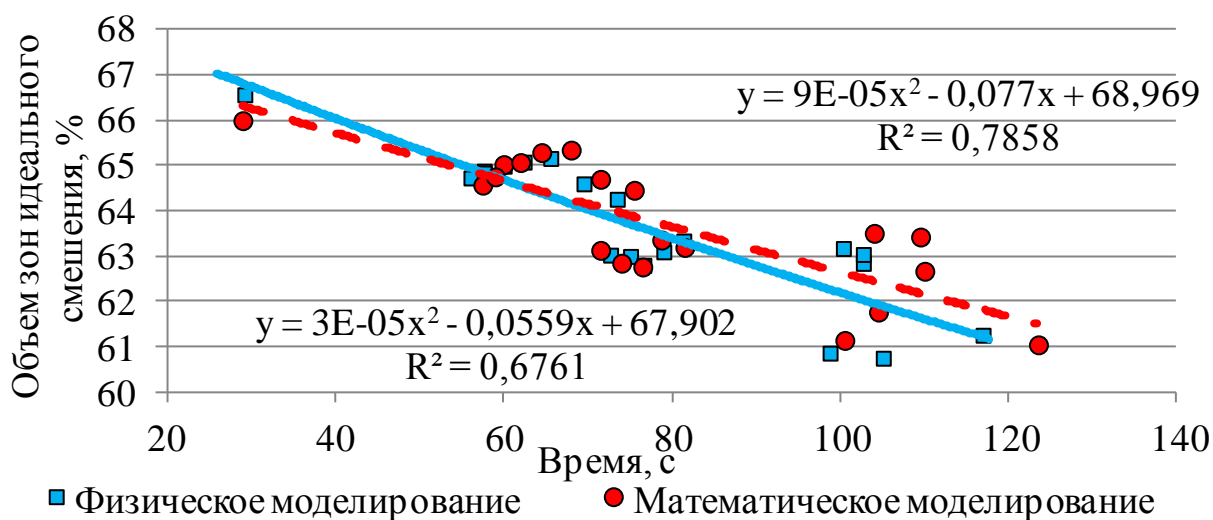


Рисунок 3.51 – Отношение объема зон идеального смещения к минимальному времени достижения потока моделирующей жидкости разливных стаканов при физическом и математическом моделировании

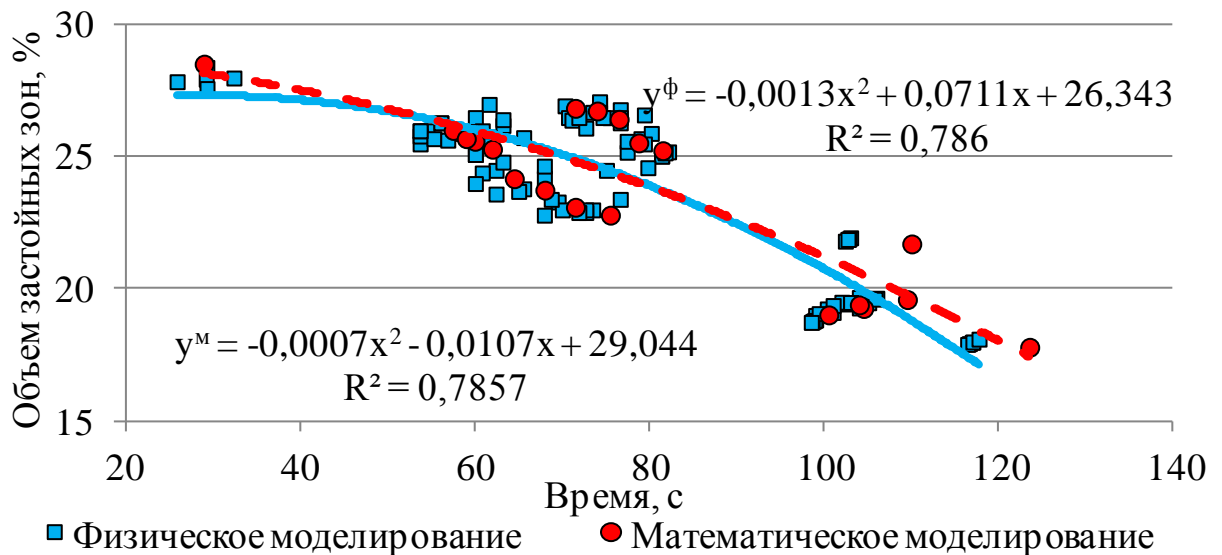


Рисунок 3.52 – Отношение объема застойных зон к минимальному времени достижения потока моделирующей жидкости разливочных стаканов при физическом и математическом моделировании

Таким образом, установлено, что значение минимального времени достижения потока разливочных стаканов оказывает существенное влияние на структуру потоков в промежуточном ковше.

Выводы

1) Получены данные о гидродинамических процессах в промежуточном ковше базового варианта конструкции. По результатам моделирования установлено, что минимальное время достижения потока моделирующей жидкости центральных и периферийных разливочных стаканов составляет 6 и 52 с соответственно, объем застойных зон составляет ~28 %, а объем зон идеального вытеснения и идеального смешения составляет ~5,5 % и ~66,5 % соответственно. Установлено наличие коротких путей к центральным разливочным стаканам, которые в промышленных условиях не позволяет обеспечить в полной мере гомогенизацию металлического расплава по химическому составу и температуре, а также рафинирование металлического

расплава от неметаллических включений, что требует применения дополнительных огнеупорных элементов для организации движения потоков металла;

2) Получены данные о гидродинамических процессах в промежуточном ковше при использовании порогов различной конфигурации. Установлено что использование порогов позволило увеличить минимальное время достижения основного потока центральных и периферийных разливочных стаканов с 6 и 52 с до 49 и 98 с соответственно и снизить объем застойных зон с 28 до 23 %;

3) По результатам моделирования установлено, что использование струегасителя позволило увеличить минимальное время достижения основного потока центральных и периферийных разливочных стаканов с 6 и 52 с до 38 и 125 с соответственно и снизить объем застойных зон с 28 до 25 %.

4) В результате исследований установлено, что наиболее благоприятные гидродинамические условия достигаются при использовании полнопрофильных перегородок. При этом приемная камера работает как струегаситель, металл, циркулирует в замкнутой области, активно перемешиваясь, способствуя укрупнению неметаллических включений. Попадая через переливные отверстия в разливочные камеры, поток металла направлен к поверхности раздела металл-ассимилирующий шлак и движется у поверхности, что способствует рафинированию расплава. При использовании перегородок с 2 рядами отверстий с диаметром (50) мм для нижнего ряда и (80) мм для верхнего ряда позволяет обеспечить достижение центральных и периферийных ручьев практически одновременно – 114 с и 120 с для центральных и периферийных ручьев, соответственно. При этом объем застойных зон составляет <18 %.

4 Анализ влияния гидродинамических условий в промежуточном ковше на качество рельсовой металлопродукции

4.1 Условия проведения промышленного исследования

Разливка стали в электросталеплавильном цехе АО «ЕВРАЗ ЗСМК» осуществляется на четырехручьевой машине непрерывного литья заготовок № 1 с получением заготовок сечением 300×360 мм. В зависимости от марки стали и температуры металла в промежуточном ковше скорость разливки составляет 0,4-0,8 м/мин. Конструктивно МНЛЗ № 1 является машиной криволинейного типа с базовым радиусом технологической оси 12 м и металлургической длиной 25,1 м. Разливка производится через промежуточный ковш номинальной емкостью 28 т, рабочее пространство которого представляет собой единую ванну, с рабочим уровнем 900 мм (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Общий вид промежуточного ковша МНЛЗ № 1
АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Из промежуточного ковша с использованием погружных стаканов металл поступает в сборные многоконусные кристаллизаторы с CuCrZr стенками высотой 780 мм. Гидравлический механизм качания обеспечивает перемещение кристаллизатора с амплитудой 0-20 мм и частотой качания 40-400 мин⁻¹. МНЛЗ оборудована системами электромагнитного перемешивания с силой тока до 800 А и мягкого обжата слитка. Параметры мягкого обжата представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры мягкого обжата

Параметр	Номер модуля						
	1	2	3	4	5	6	7
Усилие, т	14	41	52	44	45	43	56
Обжатие, мм	0,5	1,6	2,0	1,3	1,3	1,3	1,6

Для наведения покровного рафинировочного шлака используется шлакообразующая смесь (ШОС) GLUTIN GRV-2 фирмы Stollberg (Германия), добавляемая в промежуточный ковш и кристаллизатор МНЛЗ (Accutherm ST-H12/16-60GL). Химический состав ШОС представлен в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Химический состав ШОС GLUTIN GRV-2

№ п/п	Название смеси	Химическое соединение, (% содержания)									
		SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	F
1	Glutin GRV-2	43,3	3,6	1,5	18,2	0,8	5,5	-	1,1	1,7	-
2	Accutherm ST-H12/16-60GL	35,0	20,3	1,8	4,9	0,12	0,4	<0,05	10,0	0,44	5,9

В промежуточный ковш добавляется около 100 кг ШОС в начале разливки и около 30 кг в середине первой плавки.

Футеровка промежуточного ковша состоит из трех слоев: теплоизоляционный слой из муллитокремнеземистых плит (20 мм), арматурный слой (180 мм) и рабочий слой (50-70 мм) состоящий из магнезиальной торкрет массы.

В настоящее время средняя по году серийность разливки составляет 20 плавов. Сортамент сталей разливаемых на блюмовой МНЛЗ представлен в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Химический состав рельсовых марок стали (производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК»)

Марка стали	Содержание химического элемента, %									Температура ликвидус, °С	Температура солидус, °С
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	N	V		
Э76Ф Класс «В»	0,800	0,330	0,920	0,020	0,015	0,150	0,004	0,0140	0,065	1465	1339
Э76Ф На экспорт	0,760	0,310	0,860	0,020	0,020	0,150	0,004	0,0080	0,075	1469	1346
Э76Ф Низкотемпературные	0,780	0,310	0,870	0,020	0,015	0,150	0,004	0,0140	0,075	1467	1343
Э76ХГФ	0,710	0,330	0,850	0,025	0,020	0,770	0,004	0,0150	0,060	1470	1350
Э76ХФ	0,790	0,300	0,900	0,015	0,015	0,420	0,004	0,0120	0,075	1466	1343
Э78ХСФ	0,760	0,450	0,800	0,025	0,025	0,550	0,005	0,0080	0,055	1466	1340
Э85Ф	0,850	0,300	0,870	0,025	0,025	0,150	0,005	0,0080	0,090	1462	1330
Э90АФ	0,870	0,300	0,870	0,020	0,015	0,150	0,004	0,0160	0,090	1460	1326
Э68	0,600	0,240	0,770	0,030	0,025	0,150	0,005	0,0080	0,035	1478	1370
Э76 Трамвайные	0,730	0,300	0,830	0,030	0,030	0,150	0,006	0,0080	-	1471	1357

Рельсы, произведенные по ТУ 0921-276-01124323-2012, ГОСТ Р51685- 2013, EN 13674 подвергаются контролю на линии неразрушающего контроля 100 метровых рельсов (ЛНК-100 м).

Технологический цикл ЛНК -100 м включает в себя:

- ворота безопасности - определение возможности безопасной задачи рельса в ЛНК-100 м для проведения неразрушающего контроля (НК);
- измерение прямолинейности рельсов в горизонтальной и вертикальной плоскостях на устройстве «Элекон-42»;
- очистку поверхности рельсов от окалины;
- измерение профиля рельсов (ИПР НК-4);
- идентификацию номера рельса;
- вихревой контроль (ВТК) качества поверхности рельсов на установке «ЭДДИТРОН»;
- ультразвуковой контроль (УЗК) определения внутренних дефектов зеркально-теневым электромагнитно-акустическим методом на установке «СОНОТРОН-ЕМАТ 880» («сухой» УЗК);

- УЗК определения внутренних дефектов импульсным эхо-методом на установке «УКР-64Э» («мокрый» УЗК);
- маркировку рельса, для обозначения отметки факт контроля и дефектных участков.

«Мокрый» УЗК предназначен для выявления дефектов в виде внутренних несплошностей и нарушений структуры в области головки, шейки и средней части подошвы, при использовании которого применяют жидкую контактную среду (ТИ 07.151-2015). Настройка и поверка средств измерений «мокрого» УЗК, осуществляется с помощью комплекта мер моделей дефектов (КММД) СО13 по ТУ4381-92-05757676-2015. Комплект СО 13 представляет собой набор рельсов различных типов (мер моделей дефектов) с нанесёнными на них искусственными дефектами.

Контролю подвергаются: головка рельса, шейка рельса, подошва рельса (в проекции шейки). Схема прозвучивания для рельса типа Р65 (ТИ 07.151-2015) представлена на рисунке 4.2.

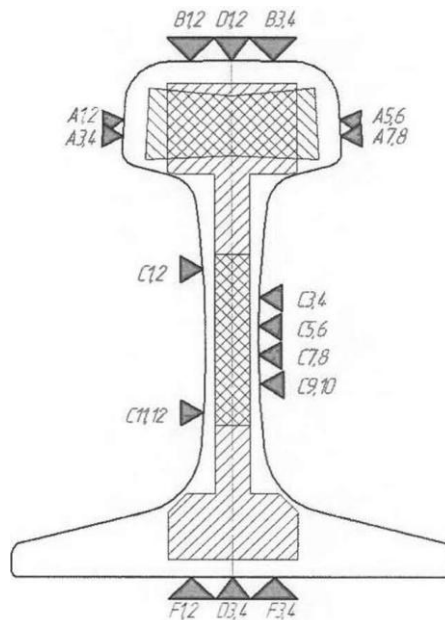


Рисунок 4.2 – Схема прозвучивания рельса типа Р65

Контроль выполняется в режиме «дублирование каналов» (16 основных и 16 дублирующих). При наличии сигнала одновременно по двум дублирующим друг друга каналам контроля участок рельса отмечается как условнодефектный и маркируется.

4.2 Анализ распределения примесей в непрерывнолитой заготовке

Значительная часть дефектов в непрерывнолитых заготовках возникает вследствие неоднородности металла по химическому составу и температуре, что особенно важно при непрерывной разливке рельсовой стали, т.к. химическая неоднородность, приводит к анизотропии механических свойств. Неравномерное распределение химических элементов по поперечному сечению непрерывнолитой заготовки оказывает влияние на напряженно-деформированное состояние металла в процессе прокатки, что приводит к изменению вероятности возникновения дефектов в зависимости от технологических условий реализации процесса.

Сталь разливаемая на центральных и периферийных ручьях МНЛЗ, как правило, имеет некоторые различия по химическому составу и температуре («горячие» и «холодные» ручьи), что обусловлено, в значительной степени гидродинамическими процессами в промежуточном ковше влияющими на гомогенизацию металла по химическому составу и температуре.

Для анализа влияния гидродинамических процессов в промежуточном ковше различной конфигурации внутреннего объема на неоднородность металла по химическому составу выполнена оценка распределения элементов по сечению непрерывнолитой заготовки до (базовый вариант) и после использования полнопрофильных перегородок разработанной конфигурации (сравнительный вариант). Исследование проводили с использованием проб поперечного сечения непрерывнолитой заготовки – темплетов (рисунок 4.3), полученных при разливке рельсовой стали марки Э76ХФ, выплавленной в 100-т дуговой электросталеплавильной печи, при дальнейшей внепечной обработке на агрегате «ковш-печь» и вакууматоре камерного типа. Химический анализ выполнен на содержание С, Мn, Si, Р, S, в связи с тем, что эти элементы оказывают наибольшее влияние на развитие ликвационных явлений. Ковшовое содержание элементов в стали, разлитой на МНЛЗ при базовом варианте: 0,82 % С, 0,81 % Мn, 0,31 % Si, 0,023 % Р, 0,008 % S, при сравнительном варианте – 0,77 % С, 0,88 % Мn, 0,32 % Si, 0,018 % Р, 0,011 % S.



Рисунок 4.3 – Темплет с третей заготовки третьего ручья (базовый вариант)

Для исследования ликвационных процессов при непрерывной разливке стали после предварительной обработки темплетов проводили их сверление в семнадцати точках с последующим отбором проб на химический анализ по схеме, приведенной на рисунке 4.4.

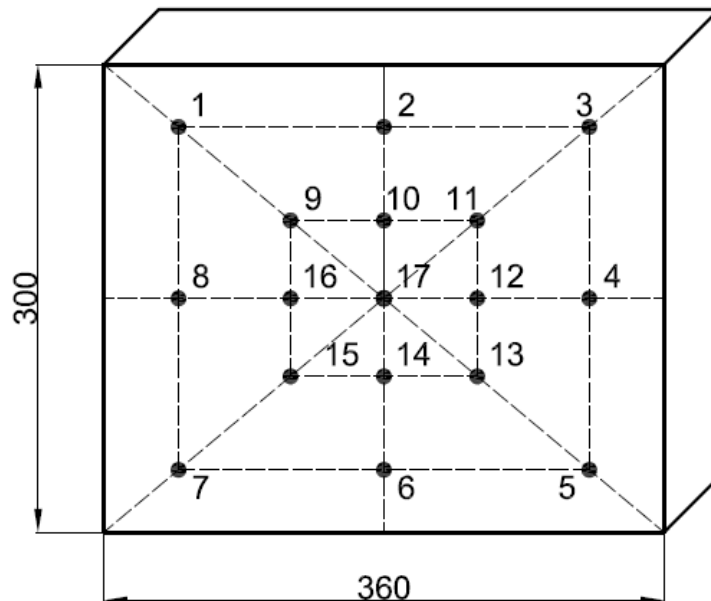


Рисунок 4.4 – Схема отбора проб на химический анализ

При базовой конструкции внутреннего объема промежуточного ковша среднее содержание элементов по сечению темплета (по 17 точкам) с третьей заготовки первого ручья (3-1) составило: 0,779 % C, 0,876 % Mn, 0,294 % Si, 0,019 % P, 0,013 % S, а с третьей заготовки третьего ручья (3-3): 0,809 % C, 0,811 % Mn, 0,313 % Si, 0,020 % P, 0,010 % S, при этом соответствующее отклонение по элементам составляет, %: 3,78; 7,45; 6,20; 6,73; 24,54.

При использовании полнопрофильных перегородок разработанной конструкции в промежуточном ковше среднее содержание элементов по сечению темплета непрерывнолитой заготовки с третьей заготовки первого ручья (3-1) составило: 0,776 % C, 0,864 % Mn, 0,304 % Si, 0,018 % P, 0,0126 % S, а с третьей заготовки третьего ручья (3-3): 0,778 % C, 0,881 % Mn, 0,303 % Si, 0,019 % P, 0,013 % S, при этом соответствующее отклонение по элементам составляет, %: 0,23; 2,00; 0,19; 4,92; 2,71. Снижение отклонения среднего содержания элементов по сечению темплетов с третьей заготовки первого ручья (3-1) и с третьей заготовки третьего ручья (3-3) при использовании полнопрофильных перегородок в промежуточном ковше составило: по углероду в 16,7 раза, по марганцу в 3,7 раза, по кремнию в 32 раза, по фосфору в 1,4 раза, по сере в 9,0 раза.

Результаты химического анализа темплетов с третей заготовки первого ручья (3-1) и третей заготовки третьего ручья (3-3) разлитой на МНЛЗ при базовом и сравнительном вариантах конфигурации внутреннего объема промежуточного ковша приведено в таблицах 4.4, 4.5.

Таблица 4. 4 – Распределение элементов по сечению непрерывнолитой заготовки (базовый вариант)

№ пробы	Содержание элементов, %										Отклонение, %				
	C	Mn	Si	P	S	C	Mn	Si	P	S	C	Mn	Si	P	S
	Заготовка 3-1					Заготовка 3-3									
1	0,75	0,87	0,27	0,016	0,012	0,79	0,87	0,34	0,014	0,010	5,1	-	20,6	12,5	16,7
2	0,78	0,88	0,29	0,019	0,012	0,76	0,86	0,34	0,016	0,010	2,6	2,3	14,7	15,8	16,7
3	0,78	0,84	0,26	0,017	0,013	0,76	0,87	0,34	0,015	0,010	2,6	3,4	23,5	11,8	23,1
4	0,78	0,83	0,30	0,017	0,012	0,76	0,86	0,34	0,019	0,010	2,6	3,5	11,8	10,5	16,7
5	0,77	0,87	0,29	0,015	0,012	0,76	0,87	0,34	0,018	0,010	1,3	-	14,7	16,7	16,7
6	0,80	0,87	0,29	0,018	0,013	0,83	0,79	0,28	0,020	0,011	3,6	9,2	3,4	10,0	15,4
7	0,77	0,87	0,30	0,018	0,012	0,83	0,80	0,29	0,020	0,010	7,2	8,0	3,3	10,0	16,7
8	0,79	0,88	0,30	0,020	0,013	0,83	0,79	0,29	0,023	0,011	4,8	10,2	3,3	13,0	15,4
9	0,78	0,88	0,31	0,017	0,013	0,78	0,78	0,30	0,021	0,011	-	11,4	3,2	19,0	15,4
10	0,79	0,88	0,29	0,020	0,013	0,84	0,77	0,30	0,018	0,010	6,0	12,5	3,3	10,0	23,1
11	0,78	0,88	0,31	0,019	0,013	0,83	0,78	0,30	0,020	0,009	6,0	11,4	3,2	5,0	30,8
12	0,75	0,90	0,30	0,019	0,014	0,84	0,78	0,31	0,025	0,009	10,7	13,3	3,2	24,0	35,7
13	0,77	0,91	0,30	0,019	0,012	0,83	0,78	0,30	0,021	0,009	7,2	14,3	-	9,5	25,0
14	0,79	0,88	0,29	0,023	0,013	0,83	0,78	0,31	0,022	0,009	4,8	11,4	6,5	4,3	30,8
15	0,80	0,88	0,30	0,020	0,012	0,83	0,81	0,33	0,021	0,009	3,6	8,0	9,1	4,8	25,0
16	0,76	0,87	0,30	0,019	0,012	0,83	0,82	0,31	0,024	0,008	8,4	5,7	3,2	20,8	33,3
17	0,77	0,91	0,29	0,023	0,012	0,76	0,75	0,34	0,025	0,010	1,3	17,6	14,7	8,0	16,7

Таблица 4.5 – Распределение элементов по сечению непрерывнолитой заготовки (сравнительный вариант)

№ пробы	Содержание элементов, %										Отклонение, %				
	C	Mn	Si	P	S	C	Mn	Si	P	S	C	Mn	Si	P	S
	Заготовка 3-1					Заготовка 3-3									
1	0,77	0,86	0,31	0,017	0,012	0,79	0,87	0,31	0,018	0,013	2,5	1,1	-	5,6	7,7
2	0,77	0,86	0,31	0,018	0,012	0,78	0,89	0,30	0,019	0,013	1,3	3,4	3,2	5,3	7,7
3	0,76	0,84	0,30	0,017	0,012	0,77	0,87	0,32	0,018	0,013	1,3	3,4	6,3	5,6	7,7
4	0,79	0,85	0,30	0,018	0,013	0,79	0,87	0,30	0,019	0,013	-	2,3	-	5,3	-
5	0,77	0,86	0,31	0,017	0,012	0,77	0,87	0,30	0,019	0,013	-	1,1	3,2	10,5	7,7
6	0,77	0,86	0,30	0,017	0,013	0,78	0,87	0,30	0,018	0,013	1,3	1,1	-	5,6	-
7	0,77	0,87	0,30	0,018	0,012	0,77	0,87	0,30	0,019	0,012	0,0	0,0	-	5,3	-
8	0,77	0,87	0,30	0,018	0,012	0,78	0,88	0,30	0,018	0,013	1,3	1,1	-	0,0	7,7
9	0,76	0,87	0,30	0,017	0,012	0,79	0,88	0,30	0,019	0,013	3,8	1,1	-	10,5	7,7
10	0,77	0,87	0,29	0,019	0,013	0,78	0,88	0,30	0,021	0,014	1,3	1,1	3,3	9,5	7,1
11	0,78	0,84	0,30	0,018	0,013	0,76	0,88	0,32	0,020	0,013	2,6	4,5	6,3	10,0	-
12	0,77	0,86	0,30	0,017	0,012	0,76	0,90	0,31	0,020	0,013	1,3	4,4	3,2	15,0	7,7
13	0,79	0,87	0,30	0,019	0,013	0,78	0,91	0,30	0,020	0,013	1,3	4,4	-	5,0	-
14	0,8	0,87	0,30	0,020	0,014	0,79	0,88	0,30	0,019	0,013	1,3	1,1	-	5,0	7,1
15	0,78	0,87	0,31	0,020	0,013	0,76	0,88	0,30	0,019	0,013	2,6	1,1	3,2	5,0	-
16	0,78	0,87	0,31	0,019	0,012	0,79	0,87	0,30	0,019	0,013	1,3	-	3,2	-	7,7
17	0,8	0,86	0,30	0,02	0,012	0,79	0,91	0,30	0,020	0,013	1,3	5,5	-	-	7,7

Для оценки равномерности распределения примесей по сечению непрерывнолитой заготовки выполнили расчет значений степени ликвации по выражению:

$$K = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{C_{\text{ковш}}} \cdot 100 \%, \quad (4.1)$$

где C_{\max} и C_{\min} – максимальное и минимальное содержание элемента по сечению темплета, %;

$C_{\text{ковш}}$ – содержание элемента в ковшевой пробе, %.

Результаты расчета степени ликвации элементов представлены на рисунке 4.5, из которого видно, что склонность к ликвации различных элементов, содержащихся в стали не одинакова, для темплета вырезанного из заготовки (3-1) распределяется следующим образом: сера (37,5 %), фосфор (25,0 %), кремний (16,1 %), марганец (9,9 %), углерод (6,1 %); из заготовки (3-3) распределяется следующим образом: сера (50 %), фосфор (34,4 %), кремний (19,4 %), марганец (12,3 %), углерод (9,8 %). При этом степень ликвации на заготовке (3-1), полученной с использованием в промежуточном ковше полнопрофильных

перегородок разработанной конструкции снизилась по углероду в 1,2 раза, марганцу и кремнию в 1,7 раза, фосфору в 1,5 раза и сере в 1,4 раза, а на заготовке (3-3) снизилась в 2,5; 2,7; 2,1; 2,1; 2,8 раза соответственно, относительно значений, полученных на заготовке с МНЛЗ при базовом варианте конструкции внутреннего объема промежуточного ковша.

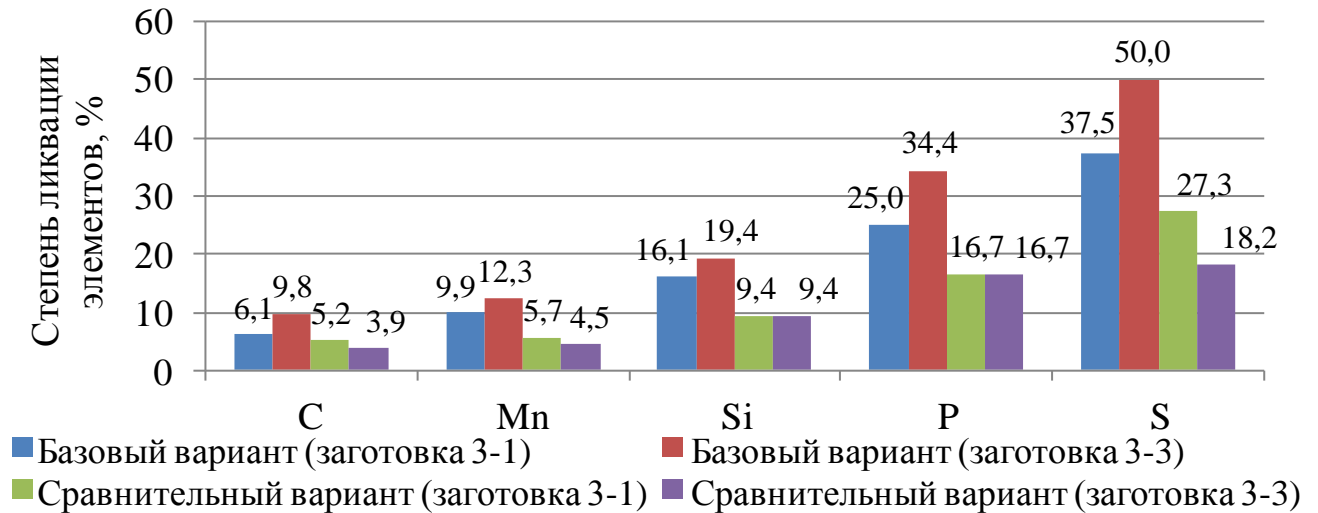


Рисунок 4.5 – Степень ликвации элементов по сечению непрерывнолитых заготовок

Дальнейшее исследование проводили при расчете степени ликвации в отдельных зонах слитка. При этом поперечное сечение слитка условно разделили на 3 зоны – центральная (рисунок 4.4, точка 17), средняя (рисунок 4.4, точки 9-16) и периферийная (рисунок 4.4, точки 1-8). Результаты расчета представлены на рисунках 4.6-4.8.

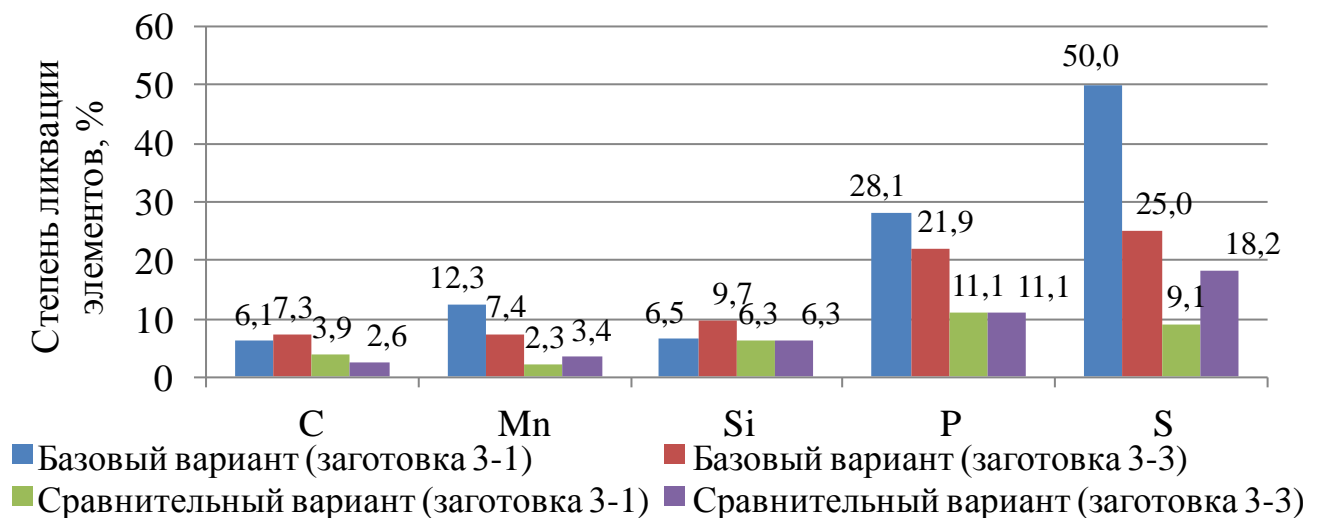


Рисунок 4.6 – Степень ликвации элементов в центральной зоне непрерывнолитой заготовки

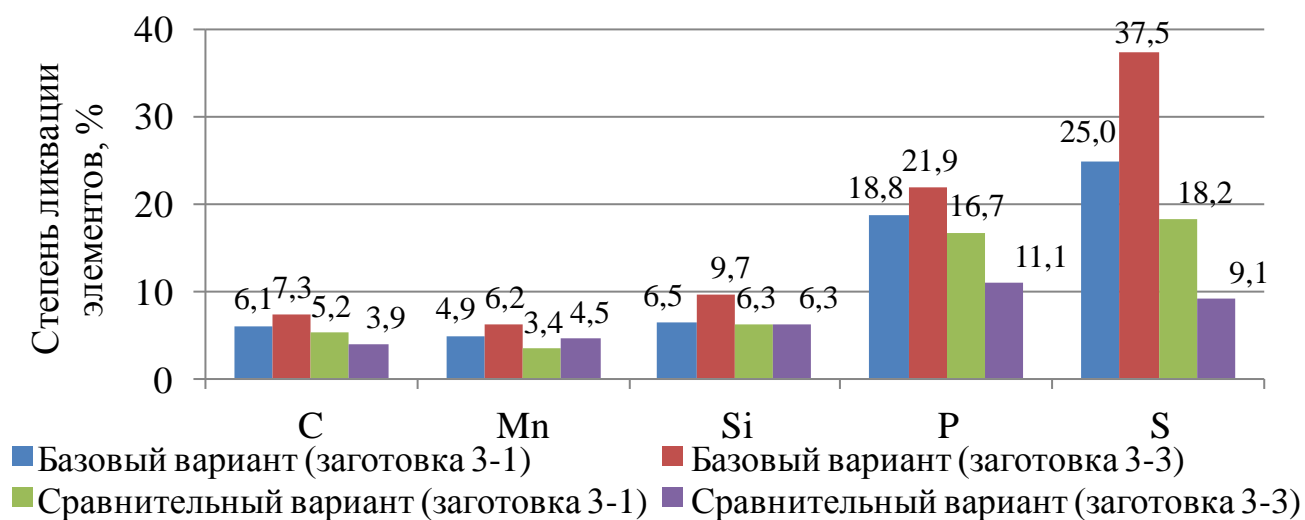


Рисунок 4.7 – Степень ликвации элементов в средней зоне непрерывнолитой заготовки

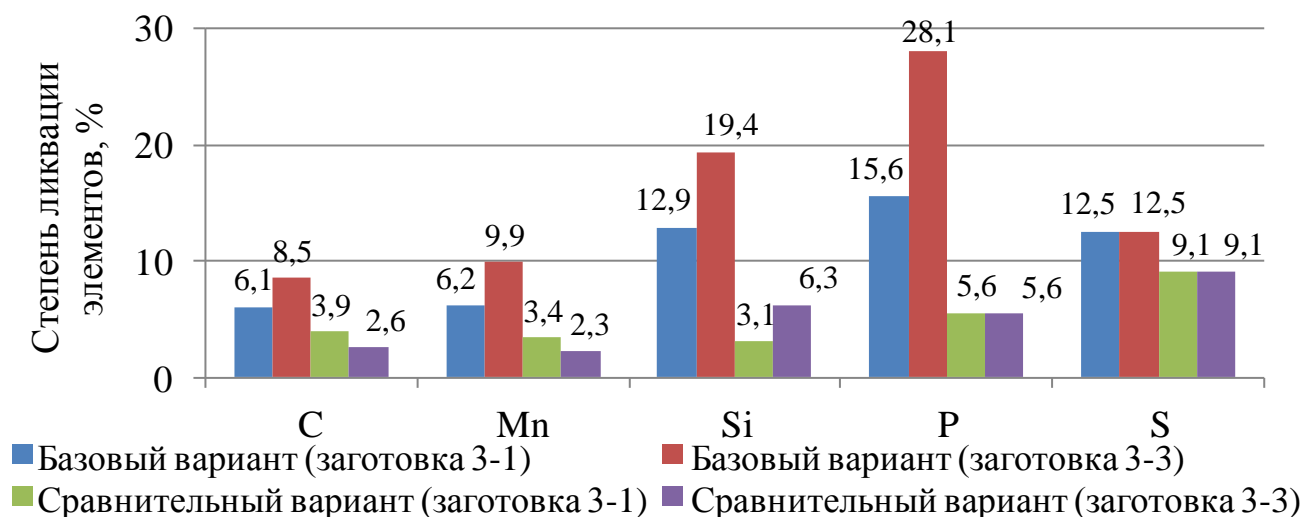
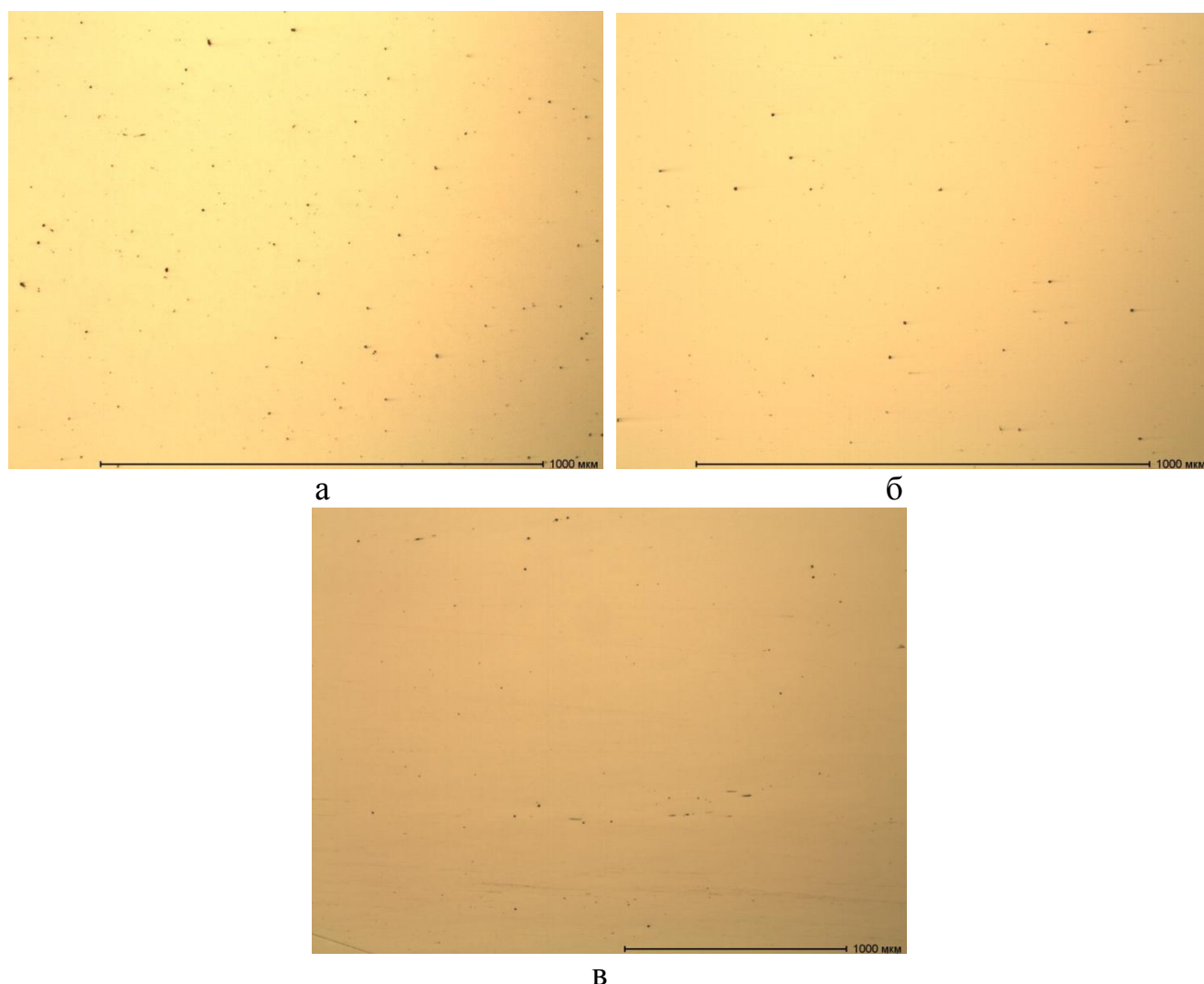


Рисунок 4.8 – Степень ликвации элементов в периферийной зоне непрерывнолитой заготовки

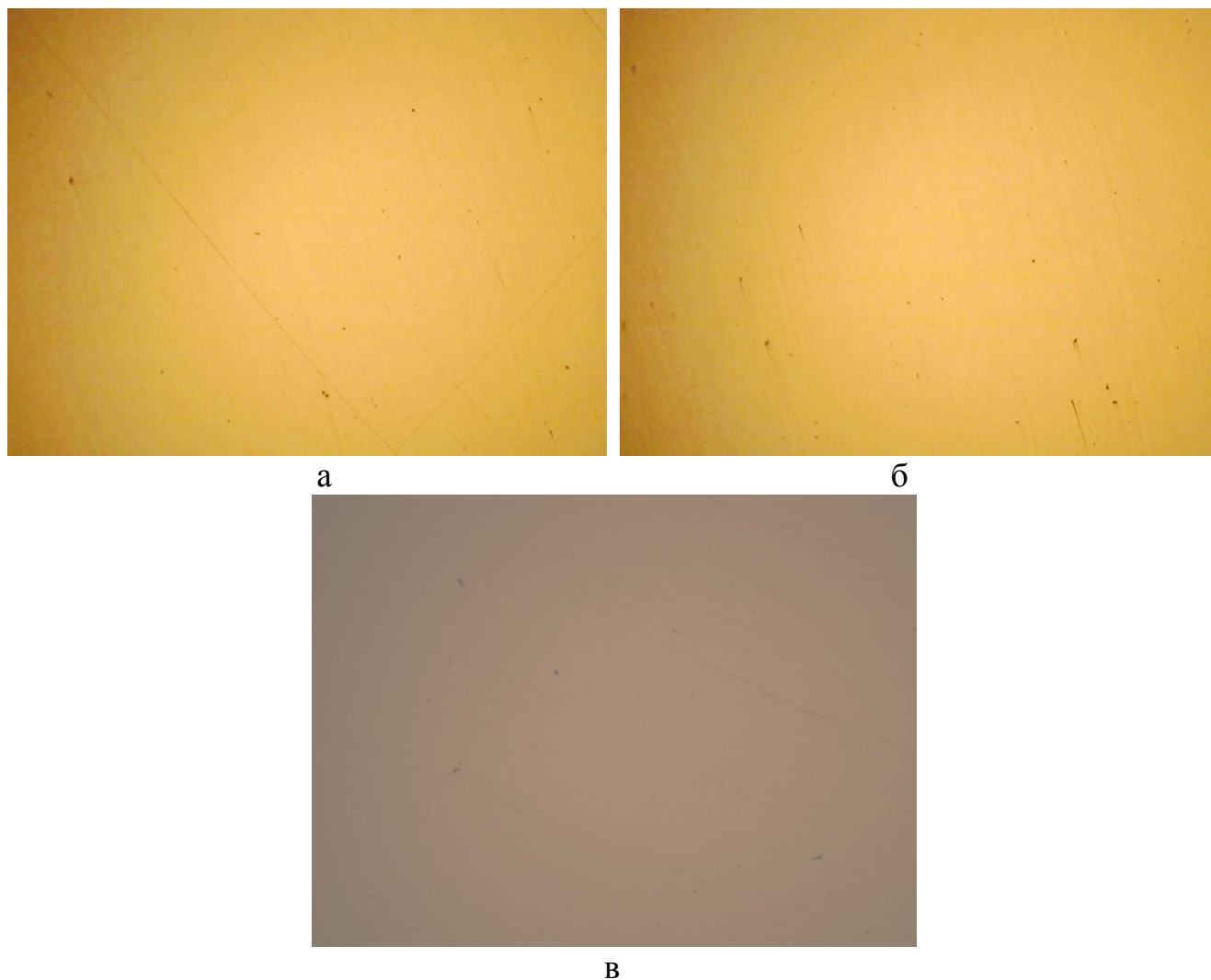
Анализ полученных результатов показал, что использование полнопрофильных перегородок разработанной конструкции в промежуточном ковше приводит к снижению неоднородности металла по химическому составу.

Для исследования загрязненности металла неметаллическими включениями (ГОСТ 1778-70) были вырезаны 6 образцов из различных зон непрерывной заготовки (центральная зона, зона столбчатых кристаллов, корковая зона) с третьей заготовки первого ручья (3-1) и третьей заготовки третьего ручья (3-3), разлитой на МНЛЗ при базовом (рисунок 4.9) и сравнительном вариантах конфигурации внутреннего объема промежуточного ковша (рисунок 4.10). Исследования проводились на нетравленых шлифах с использованием металлографического микроскопа ЛабоМет-И1 при увеличении в 100 крат в соответствии с ГОСТ 1778-70.



а – центральная зона; б – зона столбчатых кристаллов; в – корковая зона

Рисунок 4.9 – Макроструктура образца (без травления), $\times 100$
(базовый вариант, заготовка 3-3)



а – центральная зона; б – зона столбчатых кристаллов; в – корковая зона

Рисунок 4.10 – Макроструктура образца (без травления), $\times 100$
(сравнительный вариант, заготовка 3-3)

Результаты оценки загрязненности металла неметаллическими включениями (оксиды точечные) представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Результаты оценки загрязненности металла неметаллическими включениями (оксиды точечные)

Зоны непрерывнолитой заготовки	Балл загрязненности неметаллическими включениями (оксиды точечные)			
	Базовый вариант		Сравнительный вариант	
	Заготовка (3-1)	Заготовка (3-3)	Заготовка (3-1)	Заготовка (3-3)
Центральная зона	3а	3а, 2а	1а, 2а	1а
Зона столбчатых кристаллов	2а	2а, 3а	1а	1а
Корковая зона	1а	1а, 2а	1а	1а

При базовом варианте (заготовка 3-3) в центральной зоне выявлены оксиды точечные (балл 3а, 2а), силикаты недеформирующиеся (балл 2б) и сульфиды (балл 1б). В зоне столбчатых кристаллов выявлены оксиды точечные (балл 2а, 3а), силикаты недеформирующиеся (балл 1б) и незначительное количество сульфидов (балл 1а). В корковой зоне наблюдалось присутствие оксидов точечных (балл 1а, 2а). При исследовании образцов, вырезанных с заготовки (3-1) в центральной зоне, выявлены оксиды точечные (балл 3а), силикаты недеформирующиеся (балл 1б) и сульфиды (балл 1б). В зоне столбчатых кристаллов выявлены оксиды точечные (балл 2а), незначительное количество силикатов недеформирующихся (балл 1б). В корковой зоне выявлены оксиды точечные (балл 1а).

При сравнительном варианте (заготовка 3-3) в центральной зоне выявлены оксиды точечные (балл 1а), небольшое количество силикатов недеформирующихся (балл 1б) и незначительное количество сульфидов (балл 1б). В зоне столбчатых кристаллов выявлены оксиды точечные (балл 1а) и незначительное количество силикатов недеформирующихся (балл 1б). В корковой зоне выявлено присутствие оксидов точечных (балл 1а). При исследовании образцов, вырезанных с заготовки (3-1), получены схожие данные по количеству и видам неметаллических включений.

По результатам исследования установлено, что в образцах наблюдалось преимущественное наличие оксидов точечных, выявлено присутствие силикатов недеформирующихся и незначительное количество сульфидов, при этом наибольшая загрязненность неметаллическими включениями наблюдалась в центральной зоне, а наименьшая – в корковой.

Таким образом, при использовании в промежуточном ковше полнопрофильных перегородок, разработанной конструкции, наблюдается снижение загрязненности в различных зонах непрерывнолитых заготовок, полученных с центральных (3-3) и периферийных (3-1) ручьях неметаллическими включениями (оксиды точечные, силикаты недеформирующихся, сульфиды). При этом балл загрязненности оксидами точечными снизился с 3а до 1а.

4.3 Анализ качества рельсовой металлопродукции

В процессе эксплуатации МНЛЗ №1 были выявлены дефекты непрерывнолитой заготовки по неметаллическим включениям. Анализ статистических данных, приведенный на рисунке 4.11, показывает, что отбраковка металла по неметаллическим включениям, выявленным на установке автоматизированного эхо-импульсного контроля рельсов SONOTRON TM/24 («мокрого» ультразвукового контроля (МУЗК)) в соответствии с ТИ 899-РБЦ-19 за 2016 г., составил 2,64 %, за 2017 г. – 3,72 %, а в среднем за два года 3,18 % .

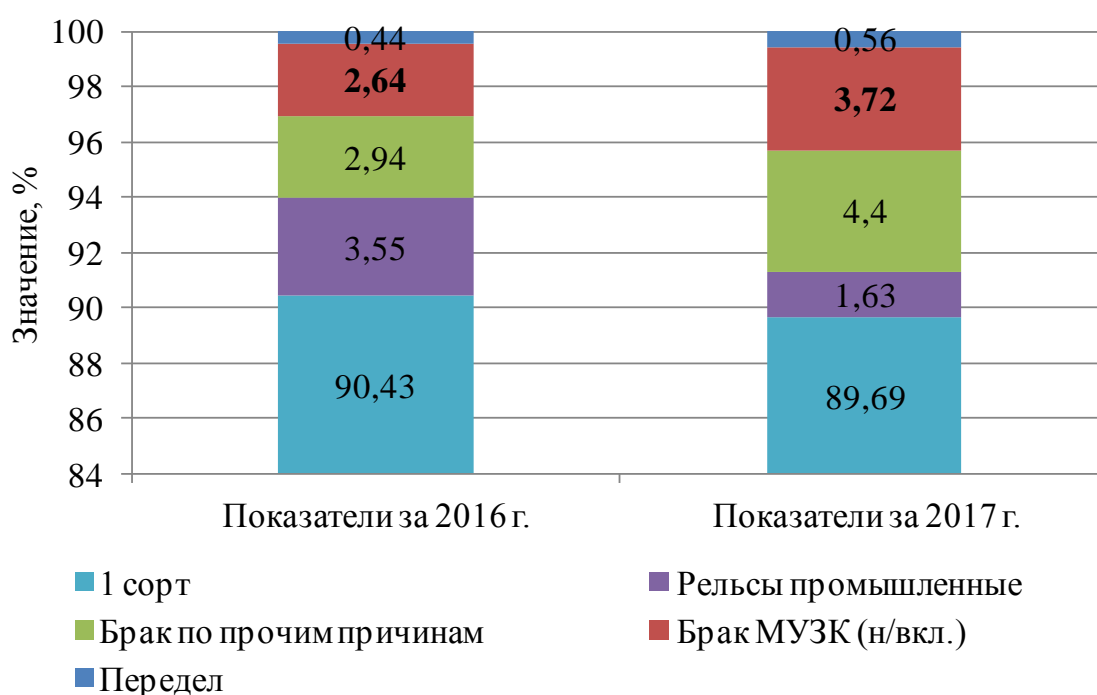


Рисунок 4.11 – Отбраковка металла на ЛНК-100 м

Для исследования внутренних дефектов, выявленных при текущем контроле на установке УКР-64Э ЛНК 100 м, проводились в испытательном центре АО «ЕВРАЗ ЗСМК» по 5 пробам (рисунок 4.12) длиной 260-300 мм, вырезанных из четырёх рельсов типа Р65 стали марки Э76ХФ (рисунок 4.13). Предварительно пробы были промаркированы. Места вырезки образцов, зоны расположения внутренних дефектов были определены дефектоскопом. При помощи датчиков была определена глубина залегания дефекта от боковой поверхности рельса, основные данные представлены в таблице 4.7.

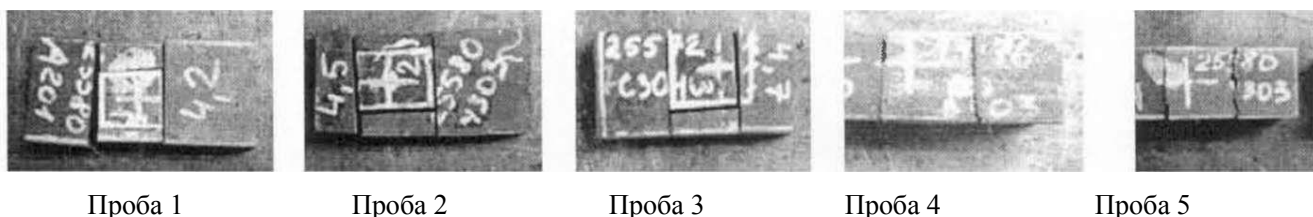


Рисунок 4.12 – Пробы, вырезанные по месту нанесённых крестообразных отметок

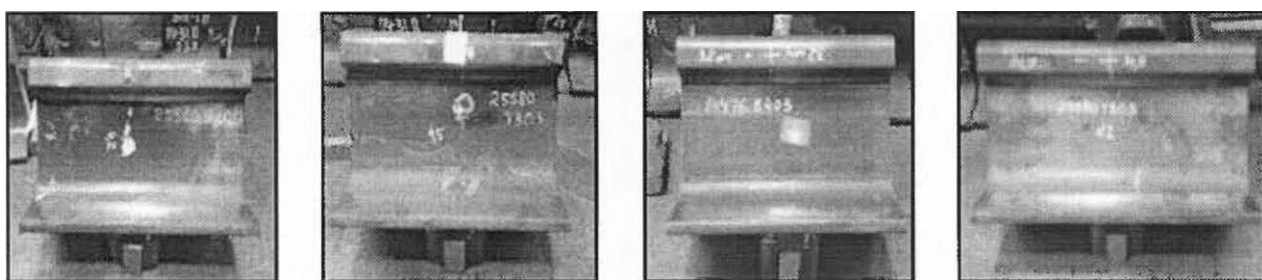


Рисунок 4.13 – Пробы рельс, отобранные для исследования

Таблица 4.7 – Основные характеристики плавок по результатам дефектоскопии

№ пробы	Элемент профиля рельса с внутренним дефектом	Датчик	Глубина залегания дефекта от боковой поверхности, мм
№1	шейка	C7	4,2
№2		C9	4,5
№3		C9	4,7
№4	головка	A1	32
№5		A1	34,9

Вырезка образцов осуществлялась в поперечном и в продольном направлении по месту тёмнотравящихся полосок и точек, соответствующих зонам расположения фиксирующих датчиков установки УКР- 64Э, с использованием ленточно-пильных станков Sirius, Hercules. Подготовка поверхности шлифов для металлографического исследования производилась на полировально-шлифовальных станках с последующим травлением в горячем 50 % водном растворе соляной кислоты.

Исследование проб на наличие неметаллических включений производилось с использованием микроскопа Axio Observer A1 m. При

анализе шлифов пробы № 1 по месту расположения датчика С7 включений не выявлено. В пробе № 2 по месту расположения датчика С9 выявлена единичная строчка неметаллических включений силикатного характера общей протяжённостью 2,225 мм (рисунок 4.14) и шириной 0,023 мм.

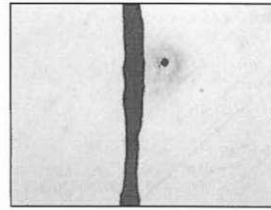
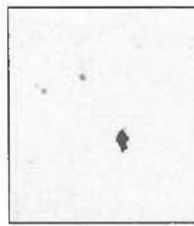
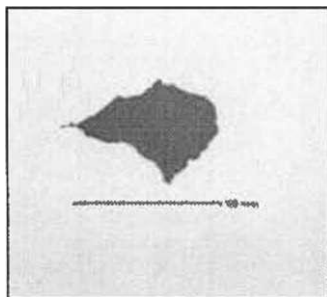
Увеличение $\times 50$ Увеличение $\times 500$

Рисунок 4.14 – Неметаллическое включение пробы № 2

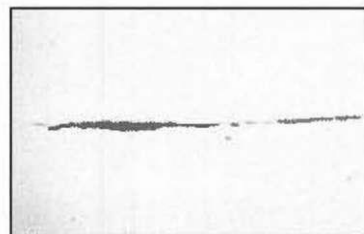
При анализе шлифов пробы № 3 по месту расположения датчика С9 выявлена строчка силиката протяженностью 0,017 мм (рисунок 4.15).

Рисунок 4.15 – Неметаллическое включение пробы № 3, $\times 500$

В пробе № 4 по месту расположения датчика А1 выявлена единичная строчка неметаллических включений общей протяженностью (в продольном направлении) 2,55 мм, шириной 0,076 мм (рисунок 4.16, а). В поперечном направлении 0,108 мм и шириной 0,073 мм (рисунок 4.16, б).



а

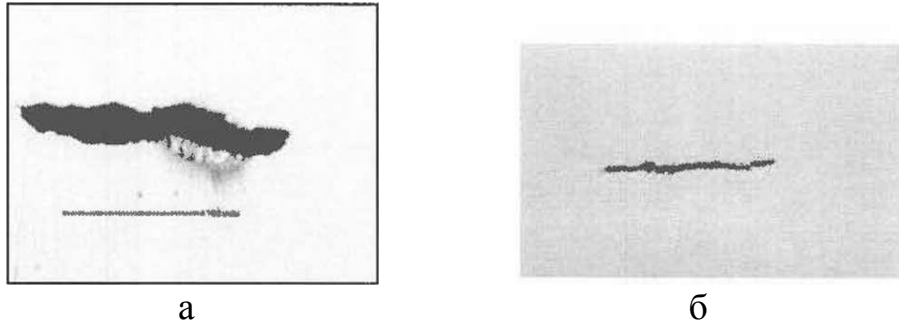


б

а – в поперечном направлении; б – в продольном направлении

Рисунок 4.16 – Неметаллическое включение пробы № 4, $\times 500$

В пробе № 5 по месту расположения датчика А1 выявлена единичная строчка неметаллических включений общей протяженностью (в продольном направлении) 0,123 мм, шириной 0,009 мм (рисунок 4.17, а). В поперечном направлении 0,199 мм, шириной 0,031 мм (рисунок 4.17, б).



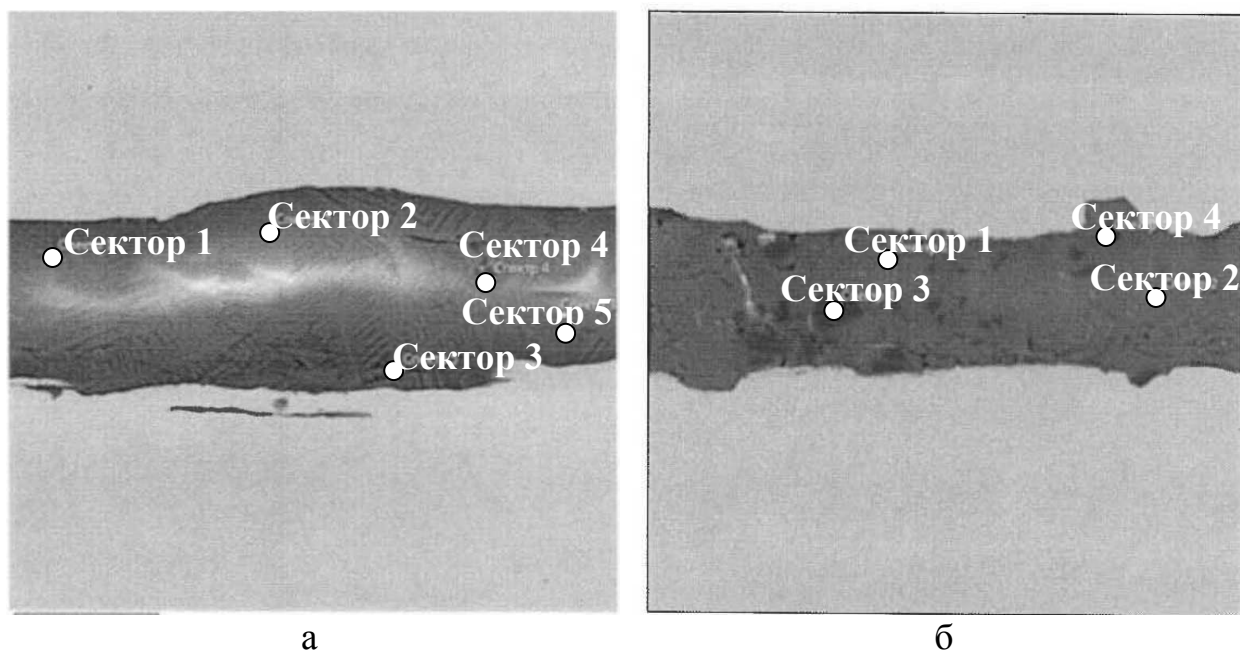
а – в поперечном направлении; б – в продольном направлении

Рисунок 4.17 – Неметаллическое включение пробы № 5, $\times 500$

Для определения химического состава неметаллических включений и распределения элементов по включениям, использовали сканирующий электронный микроскоп MIRA 3 LMN, оснащенный аналитической системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа Oxford Instruments Advanced Aztec Energy Inca350/X-max 20. Количественный анализ химического состава неметаллических включений проводили по нескольким точкам в пределах площади выбранных участков строчек, выявленных в шлифах.

В связи с тем, что в пробах №2 и №3 неметаллические включения представлены в виде силикатов, их исследование с использованием электронного микроскопа MIRA 3 LMN не проводилось. При исследовании проб № 4 и № 5 (рисунок 4.18) были получены следующие результаты (таблицы 4.8-4.11).

Анализ химического состава включения в секторах пробы № 4 показал, что основными составляющими являются оксиды кремния и кальция, среднее количество которых, в пересчете на элементы составляет 19,24 % и 15,72 %, также в состав включений в незначительном количестве входят оксиды натрия – 6,10 %, магния – 2,46 %, алюминия – 1,9 % и марганца – 6,10 %.



а – проба № 4; б – проба № 5

Рисунок 4.18 – Неметаллическое включение, разделенное на произвольные сектора

Таблица 4.8 – Химические составляющие включения по секторам пробы № 4

Химические составляющие включения	Название сектора				
	Сектор 1	Сектор 2	Сектор 3	Сектор 4	Сектор 5
O	39,33	39,08	39,16	41,87	33,21
F	7,41	10,27	8,72	11,48	5,79
Na	7,77	6,62	7,03	6,17	2,88
Mg	3,74	2,47	2,91	2,40	0,78
Al	1,89	1,86	1,86	1,90	1,99
Si	19,70	18,67	18,90	18,46	20,46
S	0,38	0,31	0,37	0,28	0,29
K	-	-	-	0,14	0,27
Ca	10,27	14,81	12,98	11,58	28,99
Ti	0,87	0,67	0,80	-	0,96
Mn	8,62	5,24	6,37	5,73	4,38
Fe	-	-	0,42	-	-
Zr	-	-	0,49	-	-

Таблица 4.9 – Сводная таблица химических составляющих по секторам пробы №4

Статистика	Химические составляющие неметаллического включения, %												
	O	F	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Zr
Максимальное содержание, %	41,87	11,48	7,77	3,74	1,99	20,46	0,38	0,27	28,99	0,96	8,62	0,42	0,49
Минимальное содержание, %	33,21	5,79	2,88	0,78	1,86	18,46	0,28	0,14	10,27	0,67	4,38	0,42	0,49
Среднее содержание, %	38,53	8,73	6,10	2,46	1,90	19,24	0,32	-	15,72	-	6,07	-	-
Стандартное отклонение	3,19	2,25	1,89	1,08	0,06	0,83	0,05	-	7,60	-	1,60	-	-

Таблица 4.10 – Химические составляющие включения по секторам пробы № 5

Химические составляющие включения	Название сектора			
	Сектор 1	Сектор 2	Сектор 3	Сектор 4
O	43,13	44,84	45,22	44,50
Mg	5,85	4,78	17,46	16,50
Al	6,89	8,68	36,40	35,34
Si	17,21	16,04	0,50	2,18
Ca	26,70	25,67	0,41	1,48
Mn	0,22	-	-	-

Таблица 4.11 – Сводная таблица химических составляющих по секторам пробы №5

Статистические данные	Химические составляющие неметаллического включения, %					
	O	Mg	Al	Si	Ca	Mn
Максимальное содержание, %	45,22	17,46	36,40	17,21	26,70	0,22
Минимальное содержание, %	43,13	4,78	6,89	0,50	0,41	0,22
Среднее содержание, %	44,42	11,15	21,83	8,98	13,57	-
Стандартное отклонение	0,91	6,76	16,24	8,87	14,58	-

При исследовании 3 проб с выявленными внутренними дефектами, расположенными в зоне датчиков С7, С9 в шейке рельсов, выявлены однотипные неметаллические включения, в основном силикатного характера. При

исследовании проб, расположенных в зоне датчика А1 в головке рельса, в пробе №4 выявлено включение силикатного характера, а в пробе №5 выявлен хрупкий силикат.

Эффективность различных конфигураций внутреннего объема промежуточного ковша оценивалась по количеству дефектов в рельсах, выявленных на установке автоматизированного эхо-импульсного контроля рельсов SONOTRON TM/24 по проведенным опытно-промышленным исследованиям без использования огнеупорных элементов в промежуточном ковше (сравнительная серия); с использованием струегасителя (рисунок 4.19); с использованием полнопрофильных перегородок. Результаты исследований на МУЗК представлены на рисунке 4.20.



а



б

а – струегаситель; б – перегородка (после эксперимента, серия 20 плавов);

Рисунок 4.19 – Промежуточный ковш МНЛЗ №1 ЭСПЦ АО «ЕВРАЗ ЗСМК», оборудованный струегасителем

Из результатов опытно-промышленных исследований (рисунок 4.20) следует, что в сравнительной серии количество выявленных неметаллических включений достигает 90 шт. или 7 %, при этом количество дефектных рельсов произведенных из заготовок разлитых на центральных ручьях составляет 62 шт. (4,8 %) и периферийных ручьях 28 шт. (2,2 %). Количество дефектов в рельсах, произведенных из заготовок, разлитых на центральных ручьях в 2,2 раза больше

чем разлитых на периферийных ручьях. Такое неравномерное распределение дефектов по центральным и периферийным ручьям свидетельствует о «коротких путях», по которым неметаллические включения с потоком расплава попадают в центральные разливочные стаканы, что согласуется с результатами физического и математического моделирования.

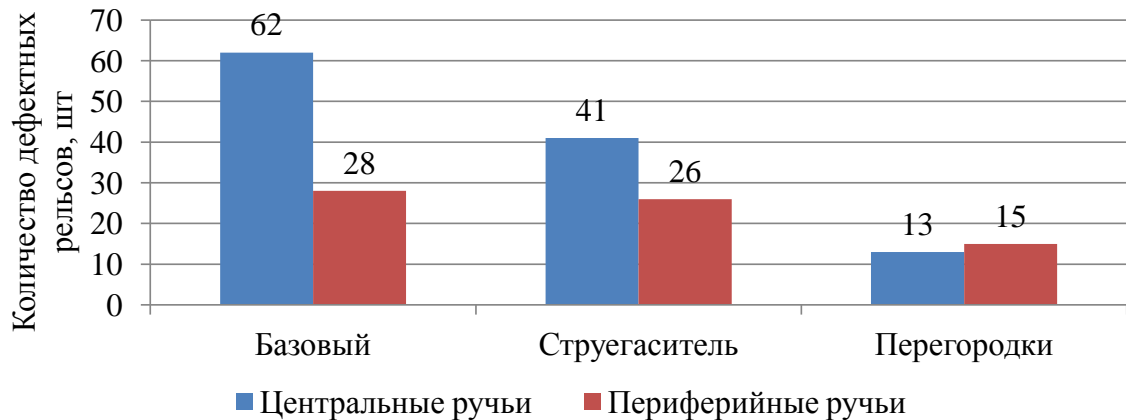


Рисунок 4.20 – Количество дефектных рельсов в серии по центральным и периферийным ручьям при различных вариантах внутренней конфигурации промежуточного ковша

При использовании струегасителя общее количество выявленных дефектов (рисунок 4.20) снизилось до 67 шт. (5,2 %) или на 25,6 % при сопоставлении со сравнительной серией, также снизилось соотношение по центральным (41 шт.) и периферийным (26 шт.) ручьям до 1,58, что свидетельствует о более благоприятных условиях для ассимиляции неметаллических включений рафинировочным шлаком, при которых основной поток расплава взаимодействует с рафинировочным шлаком в центральной области промежуточного ковша.

При установке полнопрофильных перегородок количество дефектов в серии (рисунок 4.20) составило 28 шт. (2,19 %). Количество дефектных рельсов произведенных из заготовок, разлитых на центральных и периферийных ручьях составило 13 и 15 шт. соответственно, а их соотношение 0,87, что позволяет сделать вывод о более рациональных гидродинамических условиях в промежуточном ковше при установке полнопрофильных перегородок

разработанной конструкции. При данных условиях отсутствуют короткие пути, неметаллические включения двигаясь в потоке расплава вблизи поверхности рафинировочного шлака в значительной степени им ассимилируются.

Таким образом, при использовании полнопрофильных перегородок разработанной конфигурации количество бракованных рельсов снизилось с 3,18 % до 2,19 %.

На основе анализа результатов промышленных экспериментов, физического и математического моделирования для осуществления прогнозных расчетов количества отбракованных по неметаллическим включениям рельсов (Б, %) получено соотношение:

$$Б = -19,479 \cdot V_{ив} + 5,604 \cdot V_{ис} + 15,632 \cdot V_3 = -0,0004 \tau^2 + 0,0129 \tau + 7,1096 \quad (4.1)$$

$$V_{ив} + V_{ис} + V_3 = 1, \quad (4.2)$$

где $V_{ив}$, $V_{ис}$, V_3 – объемные доли зон идеального смешения, идеального вытеснения и застойные зоны, соответственно.

На базе полученного соотношения (4.1) разработана номограмма для прогнозирования количества отбракованных рельсов на основе данных о структуре потоков в промежуточном ковше (рисунок 4.21).

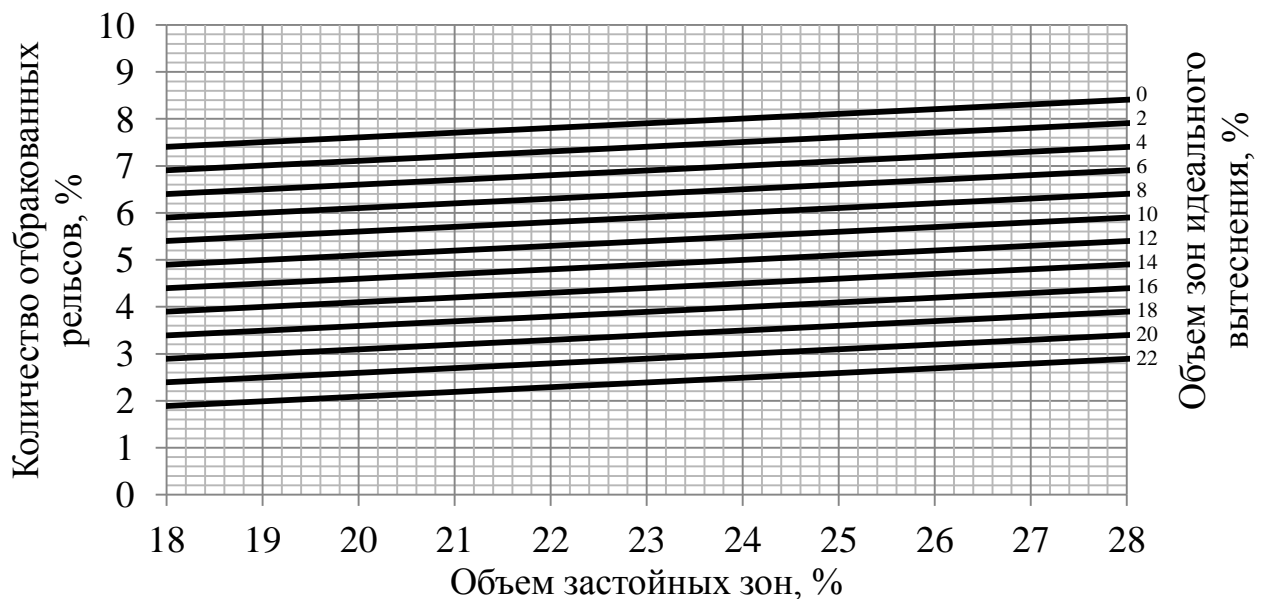


Рисунок 4.21 – Номограмма для прогнозирования количества отбракованных рельсов на основе данных о структуре потоков в промежуточном ковше

Номограмма (рисунок 4.21) позволяют при известных значениях объемов зон идеального вытеснения, идеального смешения и застойных спрогнозировать количество металлопродукции с регламентированной загрязненностью неметаллическими включениями не проводя промышленные эксперименты.

Выводы

1) Степень ликвации на заготовках с периферийных ручьев, полученных с использованием в промежуточном ковше полнопрофильных перегородок разработанной конструкции снизилась по углероду в 1,2 раз, марганцу и кремнию в 1,7 раза, фосфору в 1,5 раз и сере в 1,4 раза, а на заготовках с центральных ручьев снизилась в 2,5; 2,7; 2,1; 2,1; 2,8 раза соответственно, относительно значений, полученных на заготовках с МНЛЗ при использовании базового варианта конструкции внутреннего объема промежуточного ковша.

2) При использовании в промежуточном ковше полнопрофильных перегородок разработанной конструкции наблюдается снижение загрязненности в различных зонах непрерывнолитых заготовок, полученных с центральных и периферийных ручьях неметаллическими включениями (оксиды точечные, силикаты недеформирующихся, сульфиды). При этом балл загрязненности оксидами точечными снизился с 3а до 1а.

3) Проведенное исследование внутренних дефектов рельсов в испытательном центре АО «ЕВРАЗ ЗСМК» показало наличие неметаллических включений в отобранных образцах. Химический анализ неметаллических включений позволил установить наличие окислов кремния, кальция и алюминия;

4) В условиях ЭСПЦ АО «ЕВРАЗ ЗСМК» проведены опытно-промышленные исследования технологических вариантов рафинирования металла в промежуточном ковше блюмовой МНЛЗ. Установлено, что при использовании струегасителя общее количество отбракованных рельсов снижается с 90 (7 %) до 67 шт. (5,2 %) или на 25,6 % при сопоставлении со сравнительной серией, также снижается количество отбракованных рельсов,

произведенных из заготовок, разлитых на центральных ручьях с 62 до 41 шт. и периферийных ручьях с 28 до 26 шт., а их соотношение с 2,2 до 1,58, что свидетельствует о более благоприятных условиях для ассимиляции неметаллических включений рафинировочным шлаком, при которых основной поток расплава взаимодействует с рафинировочным шлаком в центральной области промежуточного ковша.

5) При установке полнопрофильных перегородок разработанной конфигурации количество дефектов в серии составило 28 шт. (2,19 %). Количество дефектных рельсов произведенных из заготовок, разлитых на центральных и периферийных ручьях составило 13 и 15 шт. соответственно, а их соотношение 0,87, что позволяет сделать вывод о более рациональных гидродинамических условиях в промежуточном ковше при установке полнопрофильных перегородок разработанной конструкции. При данных условиях отсутствуют короткие пути, неметаллические включения двигаясь в потоке расплава вблизи поверхности рафинировочного шлака в значительной степени им ассимилируются, при этом количество бракованных рельсов снижается на с 3,18 % до 2,19 %.

6) Созданы новые номограммы для определения структуры потоков расплава стали (объемов зон: застойной, идеального вытеснения и идеального смешения) в промежуточном ковше при производстве металлопродукции с регламентированной загрязненностью неметаллическими включениями.

Заключение

В процессе выполнения диссертационной работы, получены следующие основные результаты:

1) Для оценки эффективности гомогенизации расплава стали по химическому составу и температуре адаптирован метод исследования распределения времени пребывания жидкости в проточном реакторе непрерывного действия, основанный на определении объемов жидкого металла, образующих характерные зоны: застойную (отсутствует циркуляция расплава), идеального вытеснения (режим течения расплава приближен к ламинарному) и идеального смешения (область с равномерным перемешиванием расплава).

2) Разработан лабораторно-экспериментальный комплекс для исследования гидродинамических процессов в промежуточном ковше МНЛЗ (Патент РФ №164038).

3) На основе результатов физического и математического моделирования гидродинамических процессов в промежуточных ковшах трапецевидной формы четырехручьевых МНЛЗ с различной конфигурацией внутреннего пространства установлено что:

- использование порогов и струегасителей различных конфигураций позволяет увеличить минимальное время пребывания порции расплава в объеме промежуточного ковша в 2,5 и 2,8 раза и уменьшить объем застойных зон в 1,2 и 1,1 раза соответственно.

- при разделении внутреннего объема промежуточного ковша полнопрофильными перегородками с переливными отверстиями создается контур активной циркуляции, охватывающий значительную область промежуточного ковша, при этом разница в значениях минимального времени достижения основного потока расплава центральных и периферийных разливочных стаканов не зависит от скорости разливки, определяется общей площадью отверстий в перегородках и при ее увеличении с 17671 мм^2 до 59376 мм^2 изменяется от 2 до 52 с, достигая минимального значения при 25997 мм^2 .

4) Установлены зависимости и научно обоснованы закономерности влияния конструктивных параметров (высоты порогов и струегасителей, суммарной площади сечений, количества и компоновки отверстий перегородок) на минимальное время достижения расплава разливочных стаканов, степень гомогенизации и структуру потоков в объеме промежуточного ковша для использования в инженерных расчетах при проектировании конфигурации внутреннего объема промежуточных ковшей.

5) Разработана номограмма для определения требуемой структуры потоков металлического расплава (объемов зон: застойной, идеального вытеснения и идеального смешения) в промежуточном ковше при производстве металлопродукции с регламентированным уровнем загрязненности неметаллическими включениями.

6) В результате промышленной апробации разработанной конструкции полнопрофильных перегородок в промежуточных ковшах четырехручьевого блюмовой МНЛЗ при непрерывной разливке рельсовой стали марки Э76ХФ с получением заготовок сечением 300×360 мм условиях ЭСПЦ АО «ЕВРАЗ ЗСМК» установлено, что их применение позволяет снизить:

- степень ликвации в металле периферийных ручьев по углероду в 1,2 раз, марганцу и кремнию в 1,7 раза, фосфору в 1,5 раз и сере в 1,4 раза, а с центральных ручьев в 2,5; 2,7; 2,1; 2,1; 2,8 раза соответственно;

- балл загрязненности металла оксидами точечными с 3а до 1а;

- количество отбракованных рельсов в серии с 7,0 % до 2,19 %;

- количество дефектных рельсов, произведенных из заготовок, разлитых на центральных и периферийных ручьях в 4,8 и 1,9 раза соответственно, а их соотношение с 2,2 до 0,87.

7) Результаты диссертационной работы приняты к промышленному внедрению для совершенствования технологии непрерывной разливки рельсовой стали в электросталеплавильном цехе АО «ЕВРАЗ ЗСМК» и внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет».

Список литературы

1. Приказ Министерства промышленности и торговли РФ от 5 мая 2014 г. № 839 "Об утверждении Стратегии развития черной металлургии России на 2014 - 2020 годы и на перспективу до 2030 года и Стратегии развития цветной металлургии России на 2014 - 2020 годы и на перспективу до 2030 года" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70595824/#ixzz4FTvWX5oH>.
2. Перспективная технология производства рельсов для высокоскоростного и тяжеловесного движения / С.В. Хлыст, В.М. Кузьмиченко, В.А. Резанов [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. – 2013. – №6. – С. 14-19.
3. Результаты эксплуатации рельсов импортного производства на восточно-сибирской железной дороге / В.П. Дементьев, С.В. Фейлер, Д.В. Бойков [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2016. – Том 59. – № 6. – С. 407-413.
4. Железнодорожные рельсы из электростали / Н. А. Козырев, В. В. Павлов, Л.А. Годик, В.П. Дементьев. – Новокузнецк: Новокузнецкий металлургический комбинат, 2006. – 387с.
5. Перспективы развития рельсового производства в России [Электронный ресурс] / А.И. Борц, Е.А. В.А. Шур, С.В. Рейхарт [и др.]. – Режим доступа: http://www.rusnauka.com/17_AVSN_2012/Economics/9_112679.doc.htm
6. Борц, А.И. Исследования инновационной рельсовой продукции / А.И. Борц // Железнодорожный транспорт. – 2015. – №8.– С. 54-57
7. Гарбер, А.К. Анализ термодинамики процессов раскисления и оптимизация технологии внепечной обработки рельсовой стали: автореф. дис. ... канд. Тех. Наук. – Москва: Ин-т металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, 2009.
8. Литвинов, Р.А. Существующие состояние и перспективы развития технологии производства рельсов на ЕВРАЗ НТМК / Р. А. Литвинов, В.В. Стаканчиков, А.А. Усков // Молодой ученый. – 2014. – №20. – С. 162-167.

9. Пат. 2525969 Российская Федерация, МПК C21C 5/28. Способ выплавки и внепечной обработки высококачественной рельсовой стали / Хисамутдинов Н.Е., Гребенюк Н.А., Явойский А.В., Белов В.В.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». – № 2012143265/02; заявл. 10.10.2012; опубл. 20.08.2014, Бюл. №23.

10. Энциклопедический словарь по металлургии: Справочное издание. В 2-х т. Т. 1: А - О / Н.П.Лякишев [и др.]. – М.: «Интермет Инжиниринг», 2000. – 412 с.

11. Zhang, L. State of the Art in the Control of Inclusions during Steel Ingot Casting / L. Zhang; B.G. Thomas // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2006. – Vol 37 B, №6. – P. 733-761.

12. Смирнов, А.Н. Процессы непрерывной разливки: Монография / А.Н. Смирнов, В.Л. Пилюшенко, А.А. Минаев [и др.]. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 536 с.

13. Смирнов, А.Н. Непрерывная разливка стали: Учебник / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, Е.В. Штепан. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – 482 с.

14. Симачев, А.С. Неметаллические включения в различных зонах кристаллизации непрерывно-литой заготовки рельсовой стали / А.С. Симачев, Т.Н. Осколкова // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 5, Ч. 1. – С. 147–148.

15. Вдовин, К.Н. Рафинирование стали в промежуточном ковше МНЛЗ: Монография / К.Н. Вдовин, М.В. Семенов, В.В. Точилкин. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. – 118 с.

16. Бельченко, Г.И. Неметаллические включения и качество стали / Г.И. Бельченко, С.И. Губенко. – Киев: Техника, 1980. – 168 с.

17. Басиев, К.Д. Механо-коррозионные процессы в грунтах и стресс-коррозия в магистральных нефтегазопроводах / К.Д. Басиев, А.А. Бигулаев, М.Ю. Кодзаев // Вестник ВНЦ. – 2005. – № 1. – С. 47-53.

18. Гольдштейн, М.И. Специальные стали: учебник для вузов / М.И. Гольдштейн, С.В. Грачев, Ю.Г. Векслер. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МИСиС, 1999. – 408 с.
19. Барахтин, Б.К. Металлы и сплавы. Анализ и исследование. Физико-аналитические методы исследования металлов и сплавов. Неметаллические включения: справочник / Б.К. Барахтин, А.М. Немец / под ред. И.П. Калинкина. – СПб.: Профессионал, 2006. – 486 с.
20. Ouchi, C. Development of Steel Plates by Intensive Use of TMCP and Direct Quenching Processes / C. Ouchi // ISIJ International. Vol.41. 2001. №6. P. 542–553.
21. Кудря, А.В. Роль разномасштабных структур при обеспечении пластичности и вязкости структурно-неоднородных сталей / А.В. Кудря // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2005. – №5. – С. 18-23.
22. Paul, S.K. Influence of Inclusion Characteristics on the Formability and Toughness Properties of a Hot-Rolled Deep-Drawing Quality Steel / S.K. Paul, A. Ray // Journal of Materials Engineering and Performance. –1997. – №2. – P. 27-34.
23. Wilson, A.D. Clean Steel Technology – Fundamental to the Development of High Performance Steels / A.D. Wilson // Advances in the Production and Use of Steel with Improved Internal Cleanliness, J.K. Mahaney, Jr., Ed., American Society for Testing and Materials. – West Conshohocken, PA, 1999. – P. 73-88.
24. Леви, Л.И. Основы теории металлургических процессов и технология плавки литейных сплавов: учебник / Л.И. Леви, Л.М. Мариенбах. – М.: Машиностроение, 1970. – 496 с.
25. Исследование неметаллических включений в крупных слитках, производимых ПАО «Энергомашспецсталь» / М.В. Ефимов, А.А. Селютин, П.М. Явтушенко [и др.] // Сборник научных трудов ДонНТУ: Металлургия. – 2012. – № 1. – С. 5-9.
26. Ефимов, В.А. Современные технологии разлива и кристаллизации сплавов / В.А. Ефимов, А.С. Эльдарханов. – М.: Машиностроение, 1998. – 360 с.

27. Карташов, М.Ф. Принцип типизации неметаллических включений / М.Ф. Карташов, А.В. Канина, А.М. Игнатова // Master's Journal. – 2014. – №1. – С. 33-38.
28. Виноград, М.И. Включения в стали и ее свойства / М.И. Виноград – М.: Металлургиздат, 1963. – 252 с.
29. Кудрин, В.А. Металлургия стали: учебник для вузов / В.А. Кудрин – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1989. – 560 с.
30. Мясникова, А.А. Неметаллические включения и их влияние на качество сварных соединений при ручной дуговой сварке // Master's journal. – 2012. – №1. – С. 50-54.
31. Ефимов, В.А. Технологии современной металлургии / В.А. Ефимов, А.С. Эльдарханов. – М.: «Новые технологии», 2004. – 784 с.
32. Шульте, Ю.А. Неметаллические включения в электростали / Ю.А. Шульте. – М.: Металлургия, 1964. – 207 с.
33. Краснослободцев, И.А. Влияние раскисления стали на химическую неоднородность крупных кузнечных слитков: дис. канд. техн. наук: 05.12.05 / Краснослободцев Иван Алексеевич. – М., 1991. – 235 с.
34. Игнатов, М.Н. Идентификация и изучение свойств неметаллических включений в сварных соединениях / М.Н. Игнатов, А.М. Игнатова, А.Е. Канина // Изв. вузов. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – №2. – С. 140–148.
35. Зубарев, А.Г. Теория и технология производства стали для МНЛЗ / А.Г. Зубарев. – М.: Металлургия, 1986. – 232 с.
36. Совершенствование защиты стали от вторичного окисления при разливке на МНЛЗ / А.Н. Смирнов, А.П. Фоменко, И.А. Орлов [и др.] // Сталь. – 1998. – №11. – С. 19-23.
37. Баптизманский, В.И. Конвертерные процессы производства стали. Теория, технология, конструкции агрегатов / В.И. Баптизманский, М.Я. Меджибожский, В.Б. Охотский / К.; Донецк: Вища шк., 1984. – 344 с.

38. Непрерывная разливка сортовой заготовки: Монография. / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, А.Л. Подкорытов [и др.]. – Донецк: Цифровая типография, 2012. – 417 с.
39. Ицкович, Г.М. Раскисление стали и модифицирование неметаллических включений / Г.М. Ицкович. – М.: Металлургия, 1981. – 296 с.
40. Гизатулин, Р.А. Технология комплексной обработки металла на выпуске кальцием и алюминием / Р.А. Гизатулин, Д.В. Валуев, Ч.В. Едешева // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – №2. – С. 107-116.
41. Влияние модифицирования на формирование структуры стали и природу неметаллических включений / А.З. Исагулов, Л.А. Дахно, Е.В. Скворцов [и др.] // Труды Университета. – 2002. – №4. – С. 18-19.
42. Изменения химического состава неметаллических включений на всех этапах производства стали / Р. В. Старов, И. В. Деревянченко, В. В. Парусов [и др.]. – Сталь. – 2005. – №1. – С. 79-82.
43. Zhang, L. State of the Art in Evaluation and Control of Steel Cleanliness / L. Zhang, B.G. Thomas // ISIJ International. – 2003. – Vol. 43, № 3. – P. 271-291.
44. Включения и газы в сталях / Явойский В.И., Близнюков С.А., Вишкарёв А.Ф. [и др.] – М.: Металлургия, 1979. – 220 с.
45. Обработка металла инертными газами / Г.Н. Ойкс, А.В. Степанов, П.И. Мелихов [и др.]. – М.: Металлургия, 1970. – 112 с.
46. Управление процессами образования неметаллических включений при производстве конвертерной стали / А.А. Казаков, П.В. Ковалев, С.В. Рябошук [и др.] // Черные металлы. – 2014. – №4. – С. 43-48.
47. Дьяконов, В.П. Пути удаления неметаллических включений при вакуумировании стали / В.П. Дьяконов // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1969. – № 6. – С. 5-9
48. К вопросу о формировании неметаллических включений в сталях, раскисленных алюминием и кальцием / А.А. Ларионов, Е.А. Чичкарев, О.А. Горпинич [и др.] // Металл и литье Украины. – 2009. – № 1-2. – С. 43-46.

49. Семенов, М.В. Разработка конструкций промежуточного ковша МНЛЗ, обеспечивающих рафинирование металла / М.В. Семенов, В.В. Точилкин // Сб. науч. тр. Междунар. конф. «Современные методы конструирования и технологии металлургического машиностроения». – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. – С. 90-96.
50. Кудрин, В.А. Теория и технология производства стали: учебник для вузов / В.А. Кудрин. – М.: Мир, 2003. – 527 С.
51. Кньюппель, Г. Раскисление и вакуумная обработка стали / Г. Кньюппель. – М.: Металлургия, 1984. – 414 с.
52. Губенко, С.И. Трансформация неметаллических включений / С.И. Губенко. – М.: Металлургия, 1991. – 224 с.
53. Ефимов, Г.В. Управление процессом рафинирования стали в промежуточном ковше / Г.В. Ефимов // Сталь. – 2001. – №4. – С. 24-27.
54. Минаев, Ю. А. Поверхностные явления в металлургических процессах / Ю. А. Минаев. – М.: Металлургия. – 1984. – 152 с.
55. Теория непрерывной разливки / В.С. Рутес, В.И. Аскольдов, Д.П. Евтеев [и др.]. – М.: «Металлургия», 1971. – 296 с.
56. Добронравов, А.И. Предупреждение дефектов непрерывнолитых слэбов: Учебное пособие / А.И. Добронравов, С.К. Носов, В.Г. Суспицын. – Магнитогорск: МГМА, 1997. – 57 с.
57. Lunner, S.E. Origin and Types of slag inclusions in Non-Stabilized Austenitic Acid-Resistant Steel / S.E. Lunner // "Production and Application of Clean Steels" International Conference at Balatonfüred, Hungary. – London: The Iron and Steel Institute, 1970. – P. 124-136.
58. ГОСТ Р 51685-2000. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. – Введ. 01.07.2001. – М.: Издательство стандартов, 2001. – 36 с.
59. Симачёв, А.С. Влияние неметаллических включений непрерывнолитой заготовки рельсовой стали Э76Ф на высокотемпературную пластичность / А.С. Симачёв, Т.Н. Осколкова / Металлургия: технологии, управление, инновации,

качество: труды XVIII Всероссийской научно-практической конференции. Новокузнецк: СибГИУ, 2014. – С. 156-159.

60. Симачёв, А.С. Влияние неметаллических включений на высокотемпературную пластичность непрерывно-литой заготовки рельсовой электростали / А.С. Симачёв // Международный научно - исследовательский журнал. – Екатеринбург, 2014. – №3. – Часть 2. – С. 63-64

61. Червов, Г.А. Исследование повреждаемости рельсовой стали при малоцикловом нагружении / Г.А. Червов, В.В. Казаков, В.П. Прокудин // Известия вузов. Черная металлургия. – 1986. – №8. – С.64-68.

62. Предельная деформация транспортных систем и оценка их эксплуатационного ресурса / И.А. Воробьев, А.Ф. Лесун, П.С. Иванов, Е.Г. Благин. – Нижний Новгород: издательство «Книги», 2011. – 336 с.

63. Лысюк, В.С. Повреждение рельсов и их диагностика / В.С. Лысюк, В.М. Бугаенко. – М.: Академкнига, 2006. – 638 с.

64. Технологические требования к ж-д рельсам по стандартам разных стран. «Производство ж-д рельсов и колес» / Д.С. Казарновский, Н.Ф. Левченко, Н.Д. Левченко [и др.] // Харьков. – 1979. – №7. – С. 12-18.

65. Сырейщикова, В.И. Исследование путей снижения загрязненности рельсовой стали строчечными неметаллическими включениями / В.И. Сырейщикова, Э.Л. Колосова, Л.Н. Сиунова // Сталь и неметаллические включения. – 1980. – № 4. – С. 78-80.

66. Титова, Т.М. Некоторые особенности получения двухслойных стальных слитков / Т.М. Титова // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1999. – № 5. – С. 38- 41.

67. Дерябин, А.А. Исследование эффективности процессов раскисления, модифицирования и микролегирования рельсовой стали / А.А. Дерябин, А.В. Добужская // Сталь. – 2000. – № 11. – С. 38–43.

68. Дерябин, А.А. Повышение требований к качеству железнодорожных рельсов в новом национальном стандарте / А.А. Дерябин, В.А. Рабовский, Е.А. Шур // Сталь. – 2000. – № 11. – С. 82–85.

69. Влияние раскисления кордовой стали на природу оксидных неметаллических включений / Б. В. Линчевский, С. Н. Вартпатрикова, В. Я. Дашевский [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 2002. – № 5. – С. 14-18.

70. Козырев, Н.А. Исследование влияния параметров внепечной обработки стали на загрязненность рельсового проката оксидными включениями / Н.А. Козырев, А.А. Уманский, Д.В. Бойков // Инновации в материаловедении и металлургии: материалы IV Международной интерактивной научно-практической конференции. – Екатеринбург, 2015. – С. 247–250.

71. Козырев, Н.А. Разработка эффективных технологий раскисления и внепечной обработки рельсовой электростали, обеспечивающих повышение качества рельсов / Н.А. Козырев, А.А. Уманский, Д.В. Бойков // Актуальные проблемы современного машиностроения: сборник трудов Международной научно-практической конференции, 11–12 декабря 2014 г., Юрга. – Томск : ТПУ, 2014. – С. 238–243

72. Великанов, А.В. Влияние методов внепечной обработки на качество рельсов из кислородно-конверторной стали / А.В. Великанов, В.А. Рейхарт, В.Н. Капорцев // Сб. науч. тр. Неметаллические включения в сталях. – М.: Металлургия, 1983. – С. 35-42.

73. Симачев, А.С. Высокотемпературная пластичность рельсовой электростали стали Э76Ф / А.С. Симачев, М.В. Темлянцев, Т.Н. Осколкова // Сб. науч. тр. «Вестник РАЕН». Западно-Сибирское отделение. – Новокузнецк, 2014. – вып.16. – С. 79-82.

74. Симачев, А.С. Исследование высокотемпературной пластичности рельсовой стали марки Э76Ф / А.С. Симачев, М.В. Темлянцев, Т.Н. Осколкова // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии : сборник научных трудов. – Москва, Новокузнецк: СибГИУ, 2014. – Вып. 32. – С. 23–27.

75. Трушникова, А.С. Развитие методов определения загрязненности стали неметаллическими включениями и прогноза эксплуатационной стойкости

железнодорожных рельсов диссертация: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / Трушников Анна Сергеевна. – М., 2009. – 235 с.

76. Титова, Т.М. Резервы повышения качества рельсов. Совершенствование технологии микролегирования рельсовой стали / Т.М. Титова // Вестник ДНУЗТ. – Днепропетровск. – 2005. – №. 8. – С. 176-183.

77. Куклев, А.В. Совершенствование технологии непрерывной разливки рельсовой стали / А.В. Куклев, Л.К. Федоров, В.В. Тиняков // Сталь. – 2003. – №10. – С. 54-56.

78. Смирнов, А.Н. Теория и практика непрерывного литья заготовки / А.Н. Смирнов, А.Я. Глазков, В.Л. Пилюшенко. – Донецк: ДонГТУ, ООО «Лебедь», 2000. – С. 320-332.

79. Федоров, Л.К. Совершенствование системы вторичного охлаждения заготовок рельсовой стали / Л.К. Федоров, Е.В. Шеховцов, Л.В. Минаева // Сталь. – 2003. – № 6. – С. 21-22.

80. Современные промежуточные ковши для высокопроизводительных МНЛЗ / Смирнов А.Н., Кравченко А.В., Верзилов А.П., Ефимова В.Г // Известия вузов. Черная металлургия. – 2012. – №9. – С.19-27.

81. Кислица, В.В. Совершенствование и внедрение комплексной технологии рафинирования стали в промежуточных ковшах МНЛЗ/ В.В. Кислица, Е.А. Чичкарев, О.Б. Исаев // Чёрная металлургия: Бюл. НТИ. – 2009. – №2. – С. 17-21.

82. Захарьяс, Д.Р. Усовершенствование системы контроля потока в промежуточном ковше / Д.Р. Захарьяс, М.Р. Кларк // Сталь. – 2006. – №5. – С. 72-73.

83. Кудрин, В.А. Внепечная обработка чугуна и стали / В.А. Кудрин. – М.: Металлургия, 1992. – 336 с.

84. Troniman, J. Plasma tundish heating at Nucor Steel Nebraska / J. Troniman, D. Comacho // Iron and Steel Engineer. – 1995. – Vol. 73, №11. – P. 39-44.

85. A heating tundish – the final link in a continuous steelmaking technology / G. N. Okorokov, A. I. Donets, A. Z. Shevtsov [et al.] // Metallurgist. – 1998. – Vol.42, №1. – P. 15-20.

86. Setsuo, K. Nippon Steel Type Tundish Plasma Heater "NS-Plasma I" for Continuous Caster / K. Setsuo, W. Shuji, K. Toyohiko, H. Takafumi // Shinnittetsu Giho. – 2001. – №375. – P.145-149.

87. Синельников, В.А. Создание пилотной установки для подогрева стали в промежуточном ковше МНЛЗ с использованием низкотемпературной плазмы / В.А. Синельников, Э.Х. Исакаев, Р.Х. Амиров // Черная металлургия: Бюл. НТИ. – 2005. – №8. – С. 32-37.

88. Поволоцкий, Д.Я. Внепечная обработка стали: учебник для вузов / Д.Я. Поволоцкий, В.А. Кудрин, А.Ф. Вишкарёв. – М.: «МИСИС», 1995. – 256 с.

89. Пат. 2525969 Российская Федерация, МПК В 22D 11/10. Способ обработки металла в процессе непрерывной разливки / Уманец В.И.; Лебедев В.И.; Рябов В.В. [и др.]; заявитель и патентообладатель АО «Новолипецкий металлургический комбинат. – № 93038362/02; заявл. 26.07.1993; опубл. 19.06.1995.

90. Пат. 2085330 Российская Федерация, МПК В 22D 11/10. Способ поточного вакуумирования металла при непрерывной разливке / Уманец В.И.; Лебедев В.И.; Рябов В.В. [и др.]; заявитель и патентообладатель АО «Новолипецкий металлургический комбинат. – № 95106158/02; заявл. 19.04.1995; опубл. 27.07.1997.

91. Исакаев, М.-Э.Х. Плазменный подогрев стали и конструкции промежуточных ковшей МНЛЗ для его реализации / М.-Э.Х. Исакаев, Д. И. Тюфтяев, Д. И. Юсупов // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2015. – №1. – С. 3-7.

92. Вдовин, К.Н. Проектирование рафинирующих устройств современных промежуточных ковшей МНЛЗ / К.Н. Вдовин, В.В. Точилкин // 60 лет непрерывной разливки в России: Сборник статей. Под ред. С.В. Колпакова, Е.Х. Шахпазова. – М.: Интерконтакт, Наука, 2007. – С. 349-364.

93. Куберский, С. В. Гидравлический расчет промежуточного ковша МНЛЗ, оборудованного электромагнитным перемешивателем / С.В. Куберский // Сбор.научн. трудов. – Алчевск: ДонГТУ, 2013. – Вып. №40. – С. 87-95.

94. Фильтрация стали в процессе непрерывной разливки / А.Л. Либерман, В.А. Коржавин, Т.Н. Попова [и др.] // Сталь. – 1992. – № 4. – С. 16-18.

95. Pat. US 5071107 A. Metallurgical tundish with filter / M. Schmidt, J. Blackwood; Bethlehem Steel Corporation. – № 07/616,494; Filed 21.11.1990; Date of Patent 10.12.1991.

96. Производство высококачественной стали в условиях конвертерного производства новолипецкого металлургического комбината / В.Н. Хороняк, С.В. Себякин, В.Н. Елфимов [и др.] // Бюл. НТИ «Черная металлургия». – 2007. – № 7. – С. 14-16.

97. Pat. 6156260 A US. Chamber for reception, lateral division and redirection of liquid metal flow / L. J. Heaslip, J. D. Dorricott; Psc Technologies, Inc. – № 09/328,838; Filed 22.06.1999; Date of Patent 5.12.2000.

98. Pat. 6554167 B1 US. Impact pad / R. Barrett; North American Refractories Co. – № 09/896,672; Filed 29.06.2001; Date of Patent 29.04.2003.

99. Pat. 20020011696 A1 US. Tundish impact pad/ M. Clark; Clark Michael Robert. – № 09/917,797; Filed 31.07.2001; Date of Patent 31.01.2002.

100. Pat. 1232814 A1 EP. Impact pad for continuous casting/ A. Julio; c/o Refractaria S.A. Coto; Refractaria, S.A.. – № 20010500262; Filed 7.11.2001; Date of Patent 21.08.2002.

101. Pat. 6929775 B2 US. Tundish impact pad / C.W. Connors; Magneco / Metrel, Inc. – № 10/236,025; Filed 4.09.2002; Date of Patent. 16.08.2005.

102. Pat. 20040041312 A1 US. Tundish impact pad/ C. W. Connors; Connors Charles W – № 10/236,025; Filed 4.09.2002; Date of Patent 16.03.2004.

103. Pat. 1397221 B1 EP. Impact pad for dividing and distributing liquid metal flow / D. Xu, L. Heaslip, J. Dorricott; Vesuvius Crucible Company. – № 20020737076; Filed 22.05.2002; Date of Patent 29.07.2009.

104. Pat. 6997361 B2 US. Metallurgical impact pad / D.R. Zacharias, J. Morris, E. Wotsch; Foseco International Limited – № 10/395,150; Filed 25.03.2003; Date of Patent 14.01.2006.

105. Pat. 1676659 A1 EP. Impact pad for a tundish / D.R. Zacharias, J. Morris, E. Wotsch; Foseco International Limited. – № 20060000096; Filed 27.03.2003; Date of Patent 5.07.2006.

106. Pat. 7128247 B2 US. Fire resistant ceramic part / A. Retschnig, B. Longin, D. Pirkner; Refractory Intellectual Property Gmbh & Co. Kg. – № 10/395,150; Filed 25.03.2003; Date of Patent 14.02.2006.

107. Pat. 20090050285 A1 US. Impact pad / R. Barrett; North American Refractories Company. – 11/841,145; Filed 20.08.2007; Date of Patent 26.02.2009.

108. Pat. 20130221588 A1 US. Impact pad for use in tundish of continuous casting steel / T. A. Avila, B. A. B. Ribeiro, H. A. Santos; Thiago Augusto Avila, Bruno Augusto Batista Ribeiro, Herbert Amarildo Santos. – № 13/812,746; Filed 19.04.2011; Date of Patent 29.08.2013.

109. Pat. 2537609 A1 EP. Metal-flow impact pad and diffuser for tundish / S. Solovykh, V. Klimov, S. Malich; Calderys Ukraine Ltd.. – № 20110171203; Filed 23.06.2011; Date of Patent 26.12.2012.

110. Pat. 20140117057 A1 US. Impact pad / J.R. Reinhart; Vesuvius Crucible Company. – № 14/123,792; Filed 12.04.2012; Date of Patent 1.05.2014.

111. Pat. 6024260 A US. Tundish impact pad / D.R. Zacharias, B.R. Jardine; Foseco International Limited. – № 09/029,342; Filed 8.07.1996; Date of Patent 15.01.2000.

112. Вдовин, К.Н. Рафинирование металла в промежуточном ковше МНЛЗ: Монография / К.Н. Вдовин, М.В. Семенов, В.В. Точилкин. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. – 118 с.

113. Вдовин, К.Н. Рафинирование металла в промежуточном ковше / К. Н. Вдовин // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2015. – №1. – С. 42-46.

114. Пат. 2189292 Российская Федерация, МПК В22D 41/00. Промежуточный ковш установки непрерывной разливки стали / Тахаутдинов Р.С., Корнеев В.М., Носов А.Д. [и др.]; заявитель и патентообладатель ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». – № 2001102249/02; заявл. 24.01.2001; опубл.: 20.09.2002, Бюл. №26.

115. Пат. 2002106175 Российская Федерация, МПК В22D 11/116. Способ рафинирования стали в промежуточном ковше установки непрерывной разливки стали и устройство для его осуществления / Ламухин А.М., Лунев А.Г., Ордин В.Г. [и др.]; заявитель и патентообладатель ОАО «Северсталь». – № 2002106175/02; заявл. 07.03.2002; опубл.: 20.09.2003.

116. Лякишев, Н.П. Развитие технологии непрерывной разливки стали / Н.П. Лякишев, А.Г. Шалимов. – М.: ЭЛИЗ, 2002. – 208 с.

117. Оптимизация гидродинамических характеристик промежуточного ковша УНРС с целью удаления экзогенных неметаллических включений / А.В. Куклев, В.В. Тиняков, Ю.М. Айзин [и др.] // Металлург. – 2004. – №4. – С. 47-49.

118. Аникаева, А.А. Рафинирование металла от неметаллических включений в промковше слябовой МНЛЗ / А.А. Аникаева, Е.А. Казачков // Вестник Приазов. гос. техн. ун-та: сб. науч. тр. ПГТУ. – Мариуполь, 1999. – Вып. 8. – С. 60–64.

119. Ефимова, В.Г. Физическое моделирование на прозрачных средах процессов, протекающих в раздаточной камере промежуточного ковша МНЛЗ/ В.Г.Ефимова // Металл и литье Украины. – 2003. – № 1. – С.23-25.

120. Ефимова, В.Г. Гидродинамика промежуточного ковша и ее влияние на удаление неметаллических включений / В.Г. Ефимова // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2004. – № 8. – С. 157-158.

121. Совершенствование технологии непрерывной разливки стали в ОАО ММК / С.Н. Ушаков, Т.С. Масальский, Д.В. Юречко [и др.] // Сталь. – 2008. – № 1. – С. 16-17.

122. Пат. 74838 Российская Федерация, МПК В22D 41/08. Промежуточный ковш для непрерывной разливки металла / Воронов Г.А., Кебенко Е.В., Ушаков С.Н., Шевченко С.В.; заявитель и патентообладатель ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». – № 2008106797/22; заявл. 21.02.2008; опубл.: 20.07.2008, Бюл. №20.

123. Григорьев, А.М. Разработка технологии комплексного рафинирования стали в промежуточном ковше тонкослябовой мнлз в условиях филиала ОАО «ОМК-СТАЛЬ» / А.М. Григорьев, В.В. Кислица, Д.С. Тарвид // Труды XIII Конгресса сталеплавыльщиков. – Москва, 2014. – С.348-351.

124. Ткачев, В.И. Работоспособность сталей и сплавов в среде водорода / В.И. Ткачев, В.И. Холодный, И.Н. Левина. – Львов: Вертикаль, 1999. –252 с.

125. Касаткин, Г.Н. Влияние неметаллических включений на механические свойств наводороженных сталей / Г.Н. Касаткин // Физико–химическая механика материалов. – 2004. – №6. – С.115-119.

126. Крылов, В.П. Водородное охрупчивание стали с неметаллическими включениями / В.П. Крылов, Н.И. Воробьева // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1973. – №5. – С.40-42.

127. Бойченко, С.Б. Механизм и кинетика процессов, определяющих содержание водорода в стали в промежуточном ковше МНЛЗ / С.Б. Бойченко, Ю.С. Пройдак, Б.М. Бойченко // Процессы литья. – 2013. – № 3. С. 12-17.

128. Бойченко, С.Б. Изменение содержания водорода при непрерывной разливке высокопрочных сталей, выплавленных в дуговой электропечи / С.Б. Бойченко, Ю.С. Пройдак, А.Н. Стоянов // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2012. - №7. – С.114-118.

129. Оптимизация потоков стали в проковше при разливке сверхдлинными сериями на многоручьевых сортовых МНЛЗ / Смирнов А.Н., Кравченко А.В., Подкорытов А.Л. [и др.] // Сборник научных трудов конференции «50 лет непрерывной разливки стали в Украине». – Донецк, 2010. – С. 324-330.

130. Семенов, М.В. Система распределения потоков стали пятиручьевого промежуточного ковша МНЛЗ / М.В. Семенов, В.В. Точилкин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2007. – №2. – С. 9-11.

131. Зекели, Дж. Компьютерное конструирование промежуточного разливочного устройства / Дж. Зекели, Н. Эль-Кадах // Инжекционная металлургия. – М: Металлургия. – 1990. – С. 134-146.

132. Моделирование современных процессов внепечной обработки и непрерывной разливки стали / Исаев О.Б., Чичкарев Е.А., Кислица В.В. [и др.]. – М.: Металлургия, 2008. – 376 с.

133. Uchida, S. Production of super clean steel by slab continuous casting process /, S. Uchida, T. Masaoka, H. Uchibori // Nippon Kokan Techn. Rep. – 1982. – №36. – P. 42-54.

134. Jauch, R. Metallurgische Mabnahmen im Bereich Pfanne, Verfeiler und Kokilltzur Verbesserung des Reinheitsgrades / R. Jauch // Stahl und Eisen. –1989. – №22. S. 28-31.

135. Lifeng, Z. Evaluation and control of steel cleanliness: review / Z. Lifeng, Brian G. Thomas // 85thSteelmaking Conf. Proc., ISS-AIME, Warrendale, PA, 2002. – P. 431-452.

136. McLean, A. The turbulent tundish - contaminator or refiner? / A. McLean // 7th Int. Iron and Steel Congr. Proc. 71th Steelmak. Conf. Vol. 71: Toronto Meet. Apr. 17-20, 1988, Warrendale, Pa. – 1988. – P. 3-23.

137. Еронько, С.П. Физическое моделирование процессов внепечной обработки и разливки стали / С.П. Еронько, С.В. Быковских. – Киев: «Техника», 1998. – 136 с.

138. Гречко, А.В. Практика физического моделирования на металлургическом заводе / А.В. Гречко, Р.Д. Нестеренко, Ю.А. Кудинов. – М.: «Металлургия», 1976. – 224 с.

139. Mazumdar, D. Modeling of steelmaking processes / D. Mazumdar, J.W. Evans. – Boca Raton, London, New York: CRS Press, Taylor and Francis Group, 2010. – 463 p.
140. Страхович, К.И. Гидро- и газодинамика / К.И. Страхович. – М.: Наука, 1980. – 304 с.
141. Механика жидкости и газа: Учебное пособие для вузов. 2-е изд., пераб. и доп. / В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко, Я.М. Гордон [и др.]. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. – 464 с.
142. Quality control of scabs by electromagnetic flow modification / T. Takeniko [et al.] // Zairyo to prosesu, Current Advances in Materials and Processes. – 1996. – №4. – P. 614-615.
143. Control of flow in CC mold by imposing motion in the immersion nozzle / Y. Sshinichro [et al.] // Zairgo to prosesu. Current advances in Materials and Processes, 1966. – №4. – P. 608-609.
144. Venkatesan, K. G. Water Modelling – A tool for Effective Designing of Turbulence-suppressing Tundish Impact Pad, TURBOSTOP [Электронный ресурс] / K. G. Venkatesan, S. K. Bera, S. Khurana. – 2010. – Режим доступа: http://www.foseco-steel.com/steel/downloads/technical_papers/01.pdf
145. Mazumdar, D. The Physical and Mathematical Modelling of Continuous Casting Tundish Systems / D. Mazumdar, R.I.L. Guthrie // ISIJ International. – 1999. – Vol. 39, № 6. – P. 524-547.
146. Марченко, И.И. Полунепрерывное литье стали. - М.: Metallurgy, 1986. – 224 с.
147. Числавлев В.В., Фейлер С.В. Лабораторно - экспериментальный комплекс для изучения процессов гидродинамики при непрерывной разливке стали. // Современные вопросы теории и практики обучения в вузе: сборник научных трудов. 2015. Вып. 18. С. 60-72.
148. Пат. 164038 Российская Федерация, МПК G09B 25/02. Лабораторная установка для моделирования гидродинамики металлического расплава / Фейлер С.В., Протопопов Е.В., Числавлев В.В., Неунывахина Д.Т.; заявитель

и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет». – 2015142557/02; заявл. 06.10.2015; опубл. 20.08.2016, Бюл. №23.

149. Васильев, В.П. Аналитическая химия. В 2 кн. Кн.2: Физико-химические методы анализа: учеб. для студ. вузов, обучающихся по химико-технол. спец. / В.П. Васильев. – 5-е изд., стереотип. – М.: Дрофа, 2005. – 383 с.

150. Белоусов, В.В. Моделирование гидродинамических и теплофизических процессов в промежуточном ковше / В.В. Белоусов, Ф.В. Недопекин // Сложные технические системы и процессы. – 2003. – №1. – С. 72-80.

151. Зекели, Дж. Теплопередача и массоперенос при перемешивании металла в разливочном ковше / Дж. Зекели // Инжекционная металлургия. – 1981. – С. 199-215.

152. Чичко, А.Н. Моделирование процесса растворения углеродсодержащих порошков при обработке стали в ковше / А.Н. Чичко, Н.В. Андрианов, С.В. Терлецкий // Сталь. – 2005. – №5. – С. 23-27.

153. Кудинов, П.И. Метод расчета процессов гидродинамики и теплообмена в неортогональных криволинейных координатах / П.И. Кудинов // Вестник Днепропетровского университета. Серия Механика. – 1998. Выпуск 1. – Т.1. – С. 117-125.

154. Кудинов, П.И. Повышение эффективности алгоритмов расчета течений несжимаемой жидкости на основе уравнений Навье-Стокса // Приднепровский научный вестник. -Днепропетровск. – 1997. – №24. – С. 17.

155. Харитонов, А.А. Решение задач гидродинамики методом последовательных приближений / А.А. Харитонов, П.И. Кудинов, В.В. Загний // Численные методы в гидравлике и гидродинамике: Тезисы докл. -Донецк: ДонГУ. -1994. – С. 60.

156. Кочубей, А.А. Численное моделирование процессов конвективного переноса на основе метода конечных элементов / А.А. Кочубей, А.А. Рядно. – Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1991. – 223 с.

157. Kjellgren, P. An arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element method / P. Kjellgren, J. Hyvarinen // *Comput. Mechanics.* – 1998. – Vol.21, №1. – P. 81-90.
158. Oden, J.I. Analysis of flow of viscous fluids by finite element method / J.I. Oden, Wellford L. Carter // *AIAA Journ.* – 1972. – Vol.10, №12. – P. 72-80.
159. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа: Учебник для вузов / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
160. Дюдкин, Д.А. Математическое моделирование потоков металла в трехсекционном промежуточном ковше слябовой МНЛЗ / Д.А. Дюдкин, А.Я. Бабанин, В.В. Белоусов // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2006. – №4. – С. 47-50.
161. Андрианов, Д.Н. Численное моделирование движения потоков стали в промежуточном ковше / Д.Н. Андрианов, М.Н. Новиков, А.И. Столяров // *Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого.* – 2010. – №3. – С. 25-34.
162. Ling, H. and L. Zhang. Numerical Simulation of the Growth and Removal of Inclusions in the Molten Steel of a Two-Strand Tundish / H. Ling, L. Zhang. // *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society.* – 2013. – Vol 65, №9. – P.1155-1163.
163. Joo, S. Inclusion behavior and heat-transfer phenomena in steelmaking tundish operations: Part I. Aqueous modeling / S. Joo, R. I. L. Guthrie // *Metallurgical Transactions B.* – 1993. – Vol 24, №5. – P. 755-765.
164. Joo, S. Inclusion behavior and heat-transfer phenomena in steelmaking tundish operations: Part II. Mathematical model for liquid steel in tundishes / S. Joo, J. W. Han, R. I. L. Guthrie // *Metallurgical Transactions B.* – 1993. – Vol 24, №5. – P. 767-777.
165. Joo, S. Inclusion behavior and heat-transfer phenomena in steelmaking tundish operations: part III. Applications—computational approach to tundish design / S. Joo, J. W. Han, R. I. L. Guthrie // *Metallurgical Transactions B.* – 1993. – Vol 24, №5. – P. 779-788.

166. Numerical simulation of the extent of the transition zone in 150x150 mm cc-billets / K. Michalek, M. Sawova, J. Pindor, P. Strasak // *Acta Metallurgica Slovaca*. – 2005. – №2. – P. 207-218.

167. Model study of tundish steel intermixing and operational verification / K. Michalek, K. Gryc, M. Tkadlekova, D. Bocek // *Archives of metallurgy and materials*. – 2012. – Vol, 57. – №1. – P. 291-296.

168. Gupta, S. Performance Optimization of a Six-Strand Tundish / S. Gupta, A. Dewan // *World Journal of Mechanics*. – 2013. – Vol. 3, №3. – P. 184-193.

169. Jowza, J. Influence of Turbulence Models on Steel Flow Character in the Tundish / J. Jowza, A. Cwudzinski // *Archiv. Metali. Mater.* – 2010. – Vol. 55, №2. – P. 477-488.

170. Mathematical Modeling of the Tundish of a Single-Strand Slab Caster / R. Pardeshi, S. Basak, A. K. Singh [et al.] // *ISIJ International*. – 2004. – Vol. 44, №9. – P. 1534–1540.

171. Chattopadhyay, K. Physical and Mathematical Modelling to Study the Effect of Ladle Shroud Mis-alignment on Liquid Metal Quality in a Tundish / K. Chattopadhyay, M. Isac, R.I.L. Guthrie // *ISIJ International*. – 2011. – Vol. 51, №5. P. 759-768.

172. Singh, V. Numerical Simulation of Flow-induced Wall Shear Stress to Study a Curved Shape Billet Caster Tundish Design / V. Singh, A.R. Pal, P. Panigrahi // . – 2008. – Vol. 48, №4. P. 430-437.

173. Kumar, A. An assessment of fluid flow modelling and residence time distribution phenomena in steelmaking tundish systems / A. Kumar, S.C. Korla, D. Mazumdar // *ISIJ International*. – 2004. – Vol. 44, №8, P. 1334-1341.

174. Numerical Modeling of the Fluid Flow in Continuous Casting Tundish with Different Control Devices/ Z. He, K. Z. Liu [et al.] // *Abstract and Applied Analysis*. – 2013. – Vol 1. – P. 1-8.

175. Structure Optimization of Horizontal Continuous Casting Tundishes Using Mathematical Modeling and Water Modeling / S. Yang, L. Zhang, J. Li, K. Peaslee // ISIJ International. – 2009. – Vol. 49, №10, P. 1551-1560.

176. Merder, T. Numerical simulation of liquid flow and mixing steel in multi-strands tundish / T. Merder // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2012. – Vol. 55, №2, P. 561-566.

177. Chattopadhyay, K. Physical and mathematical modelling of inert gas shrouding in a tundish / K. Chattopadhyay, M. Isac, R.I.L. Guthrie // ISIJ International. – 2011. – Vol.51, №4. – P. 573-580.

178. Hydrodynamic and Mathematical Simulations of Flow Field and Temperature Profile in an Asymmetrical T-type Single-strand Continuous Casting Tundish / S.Liu, X.Yang, L. Du [et al.] // ISIJ International. – 2008. – Vol.48, №12. – P. 1712-1721.

179. Xu, P. Mathematical Modeling of Industrial Transport Processes / P. Xu, Z. Wu, A.S. Mujumdar. – Singapore: Transport Processes Research Group National University of Singapore, 2012. – 240 p.

180. Barreto, J. de J. Physical and Mathematical Modelling of Steel Flow and Heat Transfer in Tundishes under Non-isothermal and Non-adiabatic Conditions / J. de J. Barreto S., M.A. Barron-Mesa, R.D. Morales. // ISIJ International. – 1996. – Vol. 36, № 5. – P. 543-552.

181. Chakraborty, S. Effect of Varying Ladle Stream Temperature on the Melt Flow and Heat Transfer in Continuous Casting Tundishes / S.Chakraborty, Y.Sahai // ISIJ International. – 1991. – Vol. 31, №9. – P. 960-967.

182. Minin, I.V. Computational Fluid Dynamics Technologies and Applications / I.V. Minin, O.V. Minin. – Croatia: InTech, 2011. – 396 p.

183. ANSYS Fluent, Theory Guide, Rel. 16.2. ANSYS Inc., 2015. – 776 p.

184. Моделирование тепловых и газодинамических процессов в системе охлаждения ДВС с помощью программы Fluent: Учебное пособие / В.В. Бирюк,

И.В. Коломин, А.В. Кривцов [и др.]. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 92 с.

185. Levenspiel, O. Chemical Reaction Engineering / O. Levenspiel. – 3rd ed., New York, 1999. – 668 p.

186. Ahuja, R. Fluid flow and mixing of melt in steelmaking tundishes / R. Ahuja, Y. Sahai // Ironmaking and Steelmaking. – 1986. – vol. 13. – P. 241–247.

187. Числавлев, В.В. Исследование гидродинамических процессов в промежуточном ковше методами физического моделирования / В.В. Числавлев, С.В. Фейлер // Кузбасс: образование, наука, инновации: материалы инновационного конвента, 9 декабря 2016 г. – Кемерово, Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2016. – С. 483-485.

188. Числавлев, В.В. Исследование процессов гидродинамики металлического расплава в промежуточном ковше машины непрерывного литья заготовок / В.В. Числавлев, С.В. Фейлер // Перспективы развития металлургических технологий: сборник тезисов VIII конференции молодых специалистов, 1 марта 2017 г. – Москва, 2017. – С. 47-48.

189. Числавлев, В.В. Моделирование гидродинамических процессов в промежуточном ковше с использованием полнопрофильных перегородок / В.В. Числавлев, С.В. Фейлер // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 16-18 мая 2017 г. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2017. – Вып. 21. – Ч. 2: Естественные и технические науки.– С. 135-138.

Приложение А. Расчет ожидаемого экономического эффекта при использовании в промежуточном ковше полнопрофильных перегородок разработанной конструкции

Расчет экономических показателей мероприятия произведен для условий ЭСПЦ АО «ЕВРАЗ ЗСМК» по производственным данным за 2017 г.

Потребность в промежуточных ковшах по году:

$$N_{\text{пк}} = \frac{N_{\text{плавок}}}{S_{\text{пк}}},$$

где $N_{\text{плавок}}$ – количество произведенных плавов в год, шт/год;

$S_{\text{пк}}$ – серийность разливки ($S_{\text{пк}} = 20$ плавов/промежуточный ковш).

$$N_{\text{плавок}} = \frac{V_{\text{Ме}}}{m_{\text{плавок}}},$$

где $V_{\text{Ме}}$ – масса выплавленного металла, т/год ($V_{\text{Ме}} = 838\,383$ т/год);

$m_{\text{плав}}$ – средний вес плавки (113 т/сталеразливочный ковш).

$$N_{\text{плавок}} = \frac{838383}{113} = 7420 \text{ шт/год.}$$

$$N_{\text{пк}} = \frac{7420}{20} = 371 \text{ промежуточных ковшей/год}$$

Затраты на установку перегородок:

$$C_{\text{пер}} = C_{\text{пер}} \cdot N_{\text{пер}} \cdot N_{\text{пк}},$$

где $C_{\text{пер}}$ – цена одной перегородки, руб. ($C_{\text{пер}} = 70000$ руб.);

$N_{\text{пер}}$ – количество перегородок в промежуточном ковше, шт. ($N_{\text{пер}}=2$ шт.)

$$C_{\text{пер}}=70000 \cdot 2 \cdot 371=51940 \text{ тыс. руб./год}$$

Экономический эффект за счет снижения брака:

$$C_{\text{мет}} = \Pi_{\text{мет}} \cdot V_{\text{брак}} \cdot k_{\text{эффект}},$$

где $\Pi_{\text{мет}}$ – маржинальный доход от продаж рельс Р65, руб/т ($\Pi_{\text{мет}}=12442$ руб/т)

$V_{\text{брак}}$ – количество отбракованного металла по МУЗК, т/год
($V_{\text{брак}}=24494,12$ т/год)

$k_{\text{эффект}}$ – доля снижения брака при установке перегородок ($k_{\text{эффект}}=0,31$)

$$C_{\text{мет}} = 12442 \cdot 24494,12 \cdot 0,31 = 94474 \text{ тыс. руб/год}$$

Годовой экономический эффект от мероприятия составит:

$$\mathcal{E}_{\text{эфф.}} = C_{\text{мет}} - C_{\text{пер}}$$

$$\mathcal{E}_{\text{эфф.}} = 94474 \cdot 10^3 - 51940 \cdot 10^3 = 42534 \text{ тыс. руб/год}$$

Приложение Б. Справка о применении в производстве результатов диссертационной работы

«Утверждаю»

Директор по рельсовому

производству

АО «Евраз-Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат», к.т.н.

А.В. Головатенко

«15» 9/2018 2018 г.

СПРАВКА

о применении в производстве результатов, выполненной аспирантом
Числавлевым Владимиром Владимировичем,
 диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата
 технических наук

Основные выводы и рекомендации диссертационной работы аспиранта кафедры металлургии черных металлов ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» В.В. Числавлева, в частности, результаты физического и математического моделирования гидродинамических процессов в промежуточном ковше блюмовой МНЛЗ электроплавильного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК», а также методика оценки эффективности рафинирования металла от докристаллизационных неметаллических включений при использовании дополнительных огнеупорных элементов различных конфигураций (порогов, струегасителей, перегородок и т.д.), полученные при непосредственном участии автора, были использованы при совершенствовании внутренней конфигурации промежуточного ковша для обеспечения гомогенизации металла по химическому составу и температуре, рафинированию от неметаллических включений при непрерывной разливке стали.

Материалы диссертационной работы использованы при создании технической документации по разработке огнеупорных элементов (полнопрофильных перегородок) с обоснованием геометрических параметров переливных отверстий перегородок путем оценки рационального распределения потоков металла в объеме промежуточного ковша МНЛЗ-1.

Начальник технического отдела
 рельсового производства



Е.П. Кузнецов

Начальник сталеплавильного
 бюро технического отдела рельсового
 производства, к.т.н.



Д.В. Бойков

Приложение В. Акт о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Сибирский государственный индустриальный университет»

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе
и инновациям,

д.т.н., профессор

М.В. Темлянецв

«29»

2018 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс

Результаты диссертационной работы «Повышение качества рельсовой стали на основе рационального распределения потоков металла в промежуточном ковше», выполненной на кафедре металлургии черных металлов аспирантом В.В. Числавлевым под руководством к.т.н., доцента С.В. Фейлера, внедрены в учебный процесс при подготовке обучающихся по направлению 22.03.02 «Металлургия» и включены в программы учебных дисциплин: «Металлургия черных металлов», «Разливка и непрерывная разливка стали», «Конструкции агрегатов», а также научно-исследовательской работы и государственной итоговой аттестации решением кафедры металлургии черных металлов (выписка из протокола заседания кафедры № 17 от 28.03.2018 г.).

Начальник управления научных
исследований, к.т.н., доцент



А.И. Куценко

Начальник учебно-методического
управления, к.т.н., доцент



О.Г. Приходько

Заведующий кафедрой металлургии
черных металлов, к.т.н., доцент



С.В. Фейлер