

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

*На правах рукописи*



**Глухов Илья Васильевич**

**Совершенствование тепловой работы дуговой сталеплавильной печи при «скрап-карбюраторном» процессе выплавки полупродукта стали**

2.6.2. Metallurgy of black, colored and rare metals

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2023

Работа выполнена на кафедре «Теплофизика и информатика в металлургии» Института новых материалов и технологий ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

**Научные руководители -**

доктор технических наук, профессор  
**Воронов Герман Викторович**;  
доктор технических наук, профессор  
**Шешуков Олег Юрьевич**

**Официальные оппоненты:**

**Чуманов Илья Валерьевич**, доктор технических наук, профессор, Филиал ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» в г. Златоусте, заведующий кафедрой техники и технологии производства материалов;

**Нехамин Сергей Маркович**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий;

**Нешпоренко Евгений Григорьевич**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», заведующий кафедрой теплотехнических и энергетических систем Института энергетики и автоматизированных систем.

Защита диссертации состоится « 20 » октября 2023 г. в 13:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.6.03.08 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?id=12&rid=4966>

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Шопперт Андрей Андреевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Основными агрегатами для производства стали в мире в настоящее время становятся кислородный конвертер и дуговая сталеплавильная печь (ДСП). Производство электростали постоянно увеличивается в связи с выводом устаревших сталеплавильных мощностей и вводом в эксплуатацию мини-заводов, основным железосодержащим сырьем для которых служат различные виды металлолома. Увеличение численности автопарка и сокращение срока эксплуатации автомобилей способствует росту металлофонда за счет автомобильного лома, который в России ежегодно составляет до 20-25 млн. т. К тому же, в связи с расширением добычи нефти и газа появилось большое количество вышедшего из строя оборудования.

Широкое распространение современные дуговые сталеплавильные печи получили на машиностроительных и металлургических заводах с неполным циклом как основной сталеплавильный агрегат для переработки железосодержащей шихты с концентрацией углерода около 0,3 %, недостаточной для завершения плавки, поэтому в исходную шихту добавляют углеродсодержащие материалы (УСМ). Из-за высокой стоимости передельного чугуна распространение получил «скрап-карбюраторный» процесс.

Суть скрап-карбюраторного процесса состоит в замене передельного чугуна в шихте твердым карбюризатором, а именно, коксом, электродным боем, антрацитом и графитом. Скрап-карбюраторный процесс рассматривали как один из вариантов скрап процесса при производстве стали в мартеновских печах. Результаты исследований процессов теплогенерации и тепломассообмена при скрап-карбюраторном процессе способствуют рациональному его использованию при производстве стали на сталелитейных, машиностроительных предприятиях и мини-заводах.

В современной электрометаллургии наметилась тенденция к комплексному применению различных способов интенсификации тепловой работы дуговых сталеплавильных печей (ДСП) в целях повышения производительности. Например, распространилось использование стеновых газокислородных горелок и рафинирующих фурм.

В дуговой сталеплавильной печи газокислородные горелки предназначены, прежде всего, для ускоренного нагрева шихты первой корзины, чтобы обеспечить более быструю подачу окончательной массы материалов в рабочее пространство. Прогрев всей массы шихты до температуры плавления должен происходить равномерно по всему объему без локальных зон перегрева и оплавления. Образование поверхностной жидкой фазы приводит к снижению газопроницаемости при заполнении пустот, расположенных в нижних слоях шихты.

Интенсивное плавление возможно при условии, если создается максимальный уровень теплопередачи в объеме материалов шихты. Учитывая, что сжигание газа с кислородом производят как в диффузионном режиме, когда перемешивание газа с окислителем происходит после истечения их из горелки, так и в кинетическом – при условии предварительно подготовленной смеси газа с окислителем. Поэтому необходимо установить рациональный режим сжигания газа для интенсивной тепловой работы ДСП при «скрап-карбюраторном» процессе.

Известно, что быстрый нагрев холодной шихты с использованием дополнительного источника тепловой энергии от продуктов сгорания природного газа с кислородом обеспечивает снижение расхода электрической энергии и сокращение времени плавки. Одновременно, сжигание природного газа с кислородом в диффузионном режиме приводит к негативным результатам, таким как локальный перегрев и оплавление шихты с образованием настывшей на футеровке в шлаковом поясе сталеплавильной ванны, образованию пыли и к повышенному угару металлической части шихты.

В данной работе сделан акцент на совершенствование тепловой работы дуговых сталеплавильных печей при «скрап-карбюраторном» процессе.

### **Степень разработанности проблемы исследования**

Среди отечественных и зарубежных ученых, исследования которых связаны с развитием скрап-карбюраторного процесса производства стали известны работы Карнаухова М.М., Грум-Гржимайло В.Е., Бигеева А.М., Трубина К.Г., Ойкса Г.Н., Старцева В.А.; а с технологией производства стали в современной ДСП представлены работы Поволоцкого Д.Я., Гудима Ю.А., Зинурова И.Ю., Рябова А.В., Макарова А.Н., Меркера Э.Э., Gottardi R., Kopfle J.; по вопросам горения природного газа работали Семенов Н.Н., Щетинков Е.С., Хитрин Л.Н., Зельдович Я.Б., Лавров М.В., Китаев Б.И., Hottel H., Льюис Б., Пиз Р.Н., Тейлор Х.С. и др.

Однако, недостаточно изученными остаются вопросы нагрева холодной шихты в рабочем пространстве ДСП продуктами сгорания природного газа, сжигаемого с кислородом при «скрап-карбюраторном» процессе.

### **Цель работы**

Исследование тепловой работы дуговой сталеплавильной печи при скрап-карбюраторном процессе при введении дополнительной тепловой энергии от сжигания природного газа с кислородом в объеме шихты.

### **Задачи исследования:**

- разработать методику расчета горения природного газа с кислородом с учетом диссоциации  $\{CO_2\}$  и  $\{H_2O\}$  в продуктах сгорания при высокой температуре печи, определить физические параметры и теплофизические свойства исходных компонентов продуктов горения комбинированного слоя материалов шихты в ДСП при «скрап-карбюраторном» процессе;
- разработать конструкцию горелки, формирующей кинетический режим сжигания природного газа с кислородом без проскока пламени внутрь корпуса горелки;
- исследовать газодинамику потоков и температурные поля в рабочем пространстве печи с целью выбора рациональной установки топливосжигающих устройств для равномерного распределения продуктов сгорания в объеме рабочего пространства печи;
- разработать методику расчета времени нагрева комбинированной шихты с учетом ее порозности при «скрап-карбюраторном» процессе.

### **Научная новизна работы**

1. На основе исследований температурных и скоростных полей газодинамических потоков получены новые результаты при радиальной и тангенциальной схеме

размещения горелок в рабочем пространстве ДСП. Научно обоснована целесообразность тангенциального размещения горелок в рабочем пространстве ДСП, посредством компьютерного моделирования.

2. Предложена методика расчета горения для определения действительной температуры продуктов сгорания природного газа с кислородом с учетом диссоциации  $\{CO_2\}$  и  $\{H_2O\}$  и теплоотдачи в окружающую среду.

3. Предложен расчет физических параметров и теплофизических свойств шихты в объеме с различной порозностью, плотностью, формой и размером исходных компонентов.

### **Практическая значимость работы**

1. На основе расчетных исследований предложен способ нагрева холодной шихты продуктами сгорания природного газа, сжигаемого в атмосфере кислорода при замене диффузионного режима горения газа кинетическим.

2. Разработана конструкция новой газокислородной горелки, обеспечивающей сжигание природного газа без «проскока» пламени в корпус горелки при кинетическом режиме горения.

3. На основе расчетных исследований предложен способ рационального заполнения рабочего пространства ДСП при «скрап-карбюраторном» процессе в зависимости от насыпной плотности и доли компонентов в шихте.

4. Рекомендовано использование разработанной методики расчета горения природного газа с кислородом при нагреве многокомпонентной шихты в учебном процессе при выполнении курсовых и выпускных дипломных работ студентов.

### **Методология и методы исследования**

В представленной работе для решения задач исследования применён комплексный подход, включающий методы: моделирование процесса горения природного газа с кислородом, газодинамики и температурного состояния в рабочем пространстве ДСП с помощью специальных компьютерных программ (Компас 3D, ANSYS, SolidWorks Flow Simulation); статистическая обработка данных технической литературы; анализ теплотехнических результатов работы ДСП при «скрап-карбюраторном» процессе.

### **На защиту выносятся:**

1. Рекомендации по сжиганию природного газа с кислородом в рабочем пространстве ДСП при переходе от диффузионного к кинетическому режиму с целью интенсификации нагрева и плавления шихты при «скрап-карбюраторном» процессе.

2. Результаты моделирования радиального и тангенциального способа ввода газов в объем шихтовых материалов при «скрап-карбюраторном» процессе.

3. Конструкция разработанной новой газокислородной горелки VG, обеспечивающей рациональное сжигание природного газа в кинетическом режиме.

4. Способ загрузки комбинированной шихты в рабочее пространство ДСП при «скрап-карбюраторном» процессе.

5. Методика расчета времени нагрева шихты при граничных условиях 3<sup>го</sup> рода с использованием дифференциального уравнения теплопроводности в критериальной форме.

## **Достоверность и апробация работы**

Достоверность полученных результатов обеспечивается надёжностью исходных данных, подтверждается сопоставлением результатов моделирования с производственными данными и соответствием полученных результатов закономерностям плавки в современных дуговых сталеплавильных печах.

Основные положения работы были представлены на 9-ти научных конференциях, в том числе 3-х международных: IV Международная интерактивная научно-практическая конференция «Инновации в материаловедении и металлургии» (Екатеринбург, 2015 г.); Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2015) с международным участием, посвящённая 95-летию основанию кафедры и университета (Екатеринбург, 2015 г.); Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных с международным участием «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (Екатеринбург, 2015 г.); Научно-практическая конференция с международным участием и элементами школы молодых ученых «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершённых фундаментальных исследований и НИОКР» (Екатеринбург, 2015 г.); Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (ТИМ'2016) с международным участием (Екатеринбург, 2016 г.); VI Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (ТИМ'2017) с международным участием (Екатеринбург, 2017 г.); IX Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (ТИМ'2021) с международным участием (Екатеринбург, 2021 г.); XVI Международный конгресс сталеплавильщиков и производителей металла ISCON 2021 (Екатеринбург, 2021 г.). 27-я Международная промышленная выставка «Металл-Экспо» (Москва, 2021 г.).

## **Личный вклад соискателя**

1. Теоретическое обоснование основных положений диссертационной работы для анализа тепловой работы ДСП при «скрап-карбюраторном» процессе.

2. Выполнение компьютерного моделирования газодинамики и температурного состояния в рабочем пространстве ДСП.

3. Участие в разработке конструкции новой горелки, обеспечивающей сжигание природного газа в атмосфере кислорода.

4. Подготовка научных публикаций.

## **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 28 научных работ, в том числе 12 в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 9 статей в журналах, индексируемых в международных базах данных Scopus, WoS, 1 патент РФ на изобретение.

## Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Основной текст занимает 156 страниц, включает 64 рисунка, 25 таблиц и 121 источник.

## Благодарность

Автор выражает глубокую и искреннюю благодарность научному руководителю д.т.н., профессору кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» ИНМТ Г.В. Воронову за научное руководство и неоценимую помощь в проведении исследований и подготовке к защите диссертации на Ученом Совете; д.т.н., профессору О.Ю. Шешукову, сотрудникам кафедры ТИМ, в частности, к.т.н, профессору М.Д. Казяеву, к.т.н, доценту В.А. Гольцеву; сотрудникам ПКЦ ОАО «ВНИИМТ» в частности Д.В Мехрякову, Е.Г. Крапивиной, И.В. Малей за помощь при подготовке диссертационной работы к защите.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана общая характеристика диссертационной работы, обоснована актуальность темы диссертации, намечена цель и осуществлена постановка задач исследования, раскрыта его научная новизна и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлен аналитический обзор по теме диссертации, в результате которого, обоснована цель и поставлены задачи исследования. Выполнен статистический анализ показателей технологической и тепловой работы однотипных печей (в количестве 18 ДСП) ВПО «Союзметаллургпром», работающих по скрап-процессу. Отмечается, что при средней массе произведенной стали – 103,8 т и продолжительности плавки 3,35 ч удельный расход электроэнергии составляет 571,9 кВт·ч/т, кислорода 28,1 м<sup>3</sup>/т, чугуна 58 кг/т, раскислителей и легирующих добавок 47,7 кг/т, электродов 6,02 кг/т, угар железосодержащих компонентов шихты составил 13,8 %. Конечный продукт на выходе из печи – сталь заданной марки.

Особенность тепловой работы современной ДСП-120 состоит в том, что в печи используют дополнительный источник тепловой энергии – природный газ при сжигании его с кислородом. Печи работают как с остатком от предыдущей плавки «болотом», так и при его отсутствии, в период плавления с закрытой дугой, по скрап и «скрап-карбюраторному» процессу. При средней массе готового продукта 130 т и продолжительности плавки от выпуска до выпуска 0,90-0,95 ч, удельный расход электроэнергии составляет 370-390 кВт · ч/т, природного газа 6,0-7,0 м<sup>3</sup>/т, кислорода 40-45 м<sup>3</sup>/т, общий расход кускового и пылевидного кокса 14-24 кг/т, электродов 1,7 кг/т, угар железосодержащих компонентов шихты составляет порядка 8,0 %. На выходе из печи – полупродукт заданной марки стали. Газокислородные горелки формируют диффузионный режим сжигания природного газа с кислородом в факелах, направленных радиально в сторону электродов.

Рассмотренные результаты исследований, произведенных различными авторами, позволяют сделать вывод о том, что подробно исследованы различные варианты отдельных процессов газодинамики и теплообмена, важных для организации различных способов сжигания газа, но они не акцентированы для применения в

ДСП, работающих по «скрап-карбюраторному процессу». В современных ДСП возникает необходимость дополнительно исследовать процесс сжигания природного газа с кислородом в кинетическом режиме и нагрева объема шихты продуктами сгорания с учетом их физических параметров и теплофизических свойств, рассмотреть схемы рассредоточенного подвода тепловой энергии в холодную зону шихтовых материалов, расположенную между электродами и внутренней водоохлаждаемой стенкой.

Во **второй главе** приведен расчет горения стехиометрической смеси природного газа рабочего состава с технологическим кислородом с учетом диссоциации  $\{CO_2\}$  и  $\{H_2O\}$ . Определен расход технологического кислорода, количество и концентрация компонентов продуктов сгорания и их температура. Расчет характеристик продуктов сгорания углеводородов  $C_nH_{2n+2}$  выполнен с учетом исходных данных природного газа и кислорода. Смесь газа с кислородом предварительно перемешана при коэффициенте расхода кислорода  $\alpha_k = 1,0$ . Объем смеси и продуктов сгорания приняты условно в форме шара при горении в кинетическом режиме. Теплообмен и массообмен связан с переходом атомов диссоциации продуктов сгорания в молекулы без изменения массы при изменении энергии переходов. Внешний теплообмен продуктов сгорания происходит за счет излучения  $\{CO_2\}$  и  $\{H_2O\}$  в неограниченный объем атмосферного воздуха.

Результаты расчета, полученные с использованием программы Excel, представлены в таблице 1.

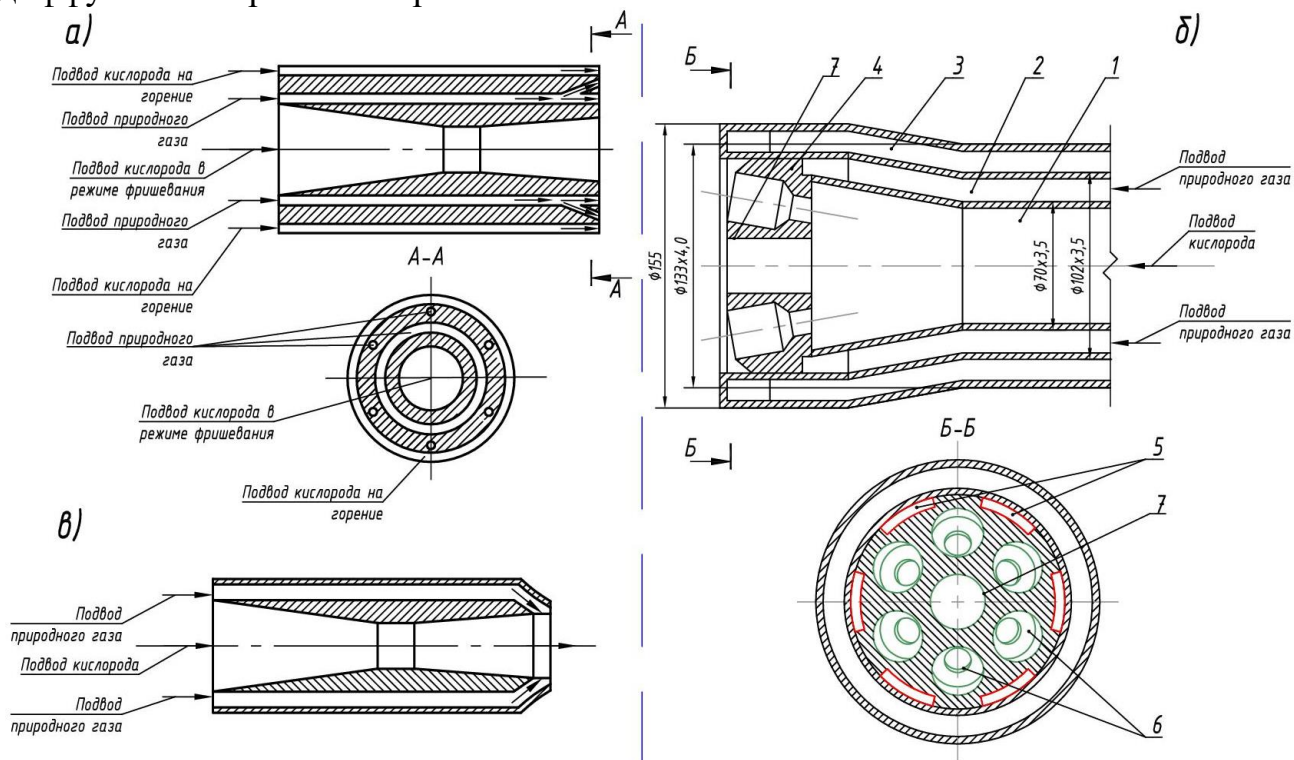
Таблица 1 – Характеристики продуктов сгорания углеводородов  $C_nH_{2n+2}$  с учетом диссоциации  $\{CO_2\}$  и  $\{H_2O\}$  при  $\alpha_k = 1,0$

Параметр	$CH_4$	$C_2H_6$	$C_3H_8$	$C_4H_{10}$
Содержание и концентрация водорода от диссоциации $\{H_2O\}$ $V_{H_2}^{дис}$ , $m^3/m^3$ / об. %	0,20/ 5,86	0,38/ 6,61	0,59/ 7,18	0,82/ 7,65
Содержание и концентрация недиссоциированного водяного пара $V_{H_2O}^{н.дис}$ , $m^3/m^3$ / об. %	1,79/ 52,87	2,60/ 44,77	3,38/ 40,97	4,15/ 38,61
Содержание и концентрация оксида углерода от диссоциации $\{CO_2\}$ $V_{CO}^{дис}$ , $m^3/m^3$ / об. %	0,39/ 11,40	0,88/ 15,22	1,43/ 17,28	2,02/ 18,77
Содержание и концентрация недиссоциированного диоксида углерода $V_{CO_2}^{н.дис}$ , $m^3/m^3$ / об. %	0,62/ 18,15	1,12/ 19,30	1,58/ 19,16	2,00/ 18,59
Содержание и концентрация кислорода от диссоциации $\{H_2O\}$ и $\{CO_2\}$ $V_{O_2}^{дис}$ , $m^3/m^3$ / об. %	0,29/ 8,62	0,63/ 10,91	1,01/ 12,22	1,42/ 13,20
Общий объем продуктов сгорания $V_{\alpha_k=1}^{дис}$ , $m^3/m^3$	3,39	5,81	8,26	10,74
Химический недожог $Q_3^{дис}$ , кДж / %	7030/ 19,64	15321/ 23,81	24432/ 26,11	34336/ 27,79
Балансовая температура $t_0^б$ , °С	2692	2703	2728	2746
Степень черноты продуктов сгорания $\epsilon'_{угл}$	0,278	0,268	0,262	0,257
Действительная температура $t_d$ , °С	2433	2512	2555	2588



Результаты расчета горения природного газа и углеводородов метанового ряда позволяют предложить кинетический режим сжигания газа на действующей ДСП. Отмечено, что сжигание предварительно перемешанной исходной смеси сопровождается образованием высокотемпературных продуктов сгорания, содержащих 5,86-7,65 об. %  $H_2$  и 11,40-18,77 об. %  $CO$ , соответствующим химическому недожогу 19,64-27,79 % при содержании свободного кислорода от 8,62 до 13,20 об. %.

В третьей главе представлены результаты исследования газокислородных горелок (ГКГ) современных конструкций НТПФ «Эталон», фирмы VAI FUCHS, фирмы SMS DEMAG (рис. 1), обеспечивающих сжигание природного газа с кислородом в диффузионном режиме горения.



а) – горелка фирмы VAI FUCHS; б) – горелка НТПФ «Эталон»; в) – горелка фирмы SMS DEMAG  
Рисунок 1 – Варианты конструктивного исполнения газокислородных горелок (ГКГ)

С помощью компьютерного моделирования установлено, что действующие современные ГКГ не предназначены для сжигания предварительно перемешанной исходной смеси, так как горение газа сопровождается затягиванием факела во внутренний объем горелки и происходит так называемый «проскок» факела в горелку в диапазоне изменения концентрации кислорода в КВС от 20 до 95 масс. %.

На рис. 2 приведена разработанная с соавторами конструкция ГКГ (VG) с предварительным перемешиванием природного газа с кислородом, исключая режим «проскока» факела и обеспечивающая кинетический режим горения газа с высокотурбулентным движением продуктов сгорания.

В предложенной конструкции горелки VG сопло Лавалья с криволинейной поверхностью конфузора и диффузора формирует максимальную скорость потока кислорода в ее выходном сечении. С использованием разработанной программы в Microsoft Excel 2016 рассчитаны диаметры конфузора, критического сечения, диффузора, их линейные размеры и профиль криволинейной поверхности конфузора и диффузора горелки VG для ДСП-120.

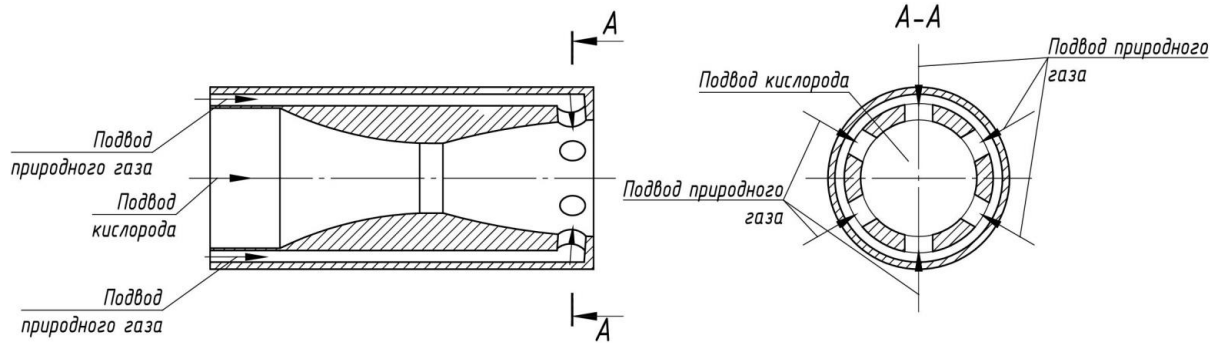
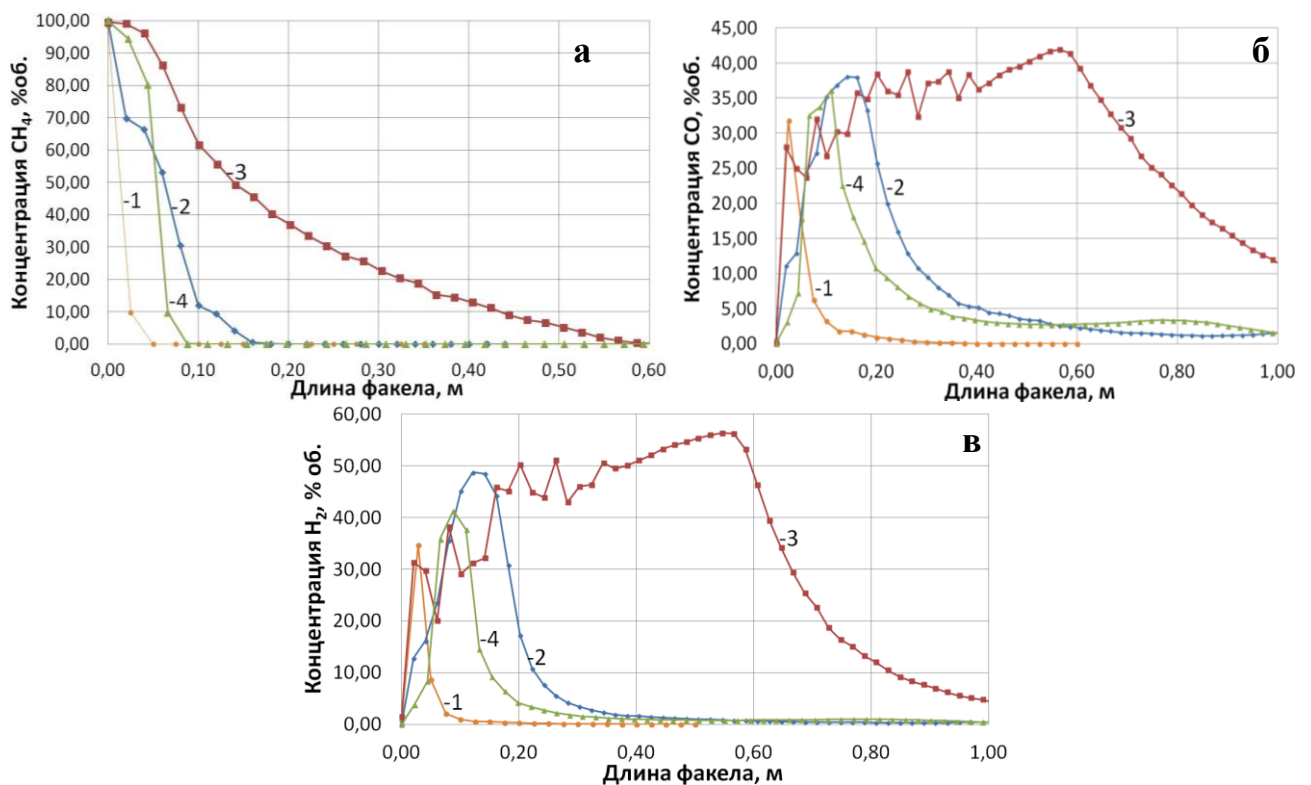


Рисунок 2 – Схема газокислородной горелки VG с криволинейным профилем поверхности конфузора и диффузора

Исследование горения природного газа с кислородо-воздушной смесью (КВС) выполнено с помощью компьютерного моделирования в пакете программ ANSYS в модуле CFX. В результате получены сравнительные показатели работы горелок НТПФ «Эталон»; VAI FUCHS; SMS DEMAG, создающих диффузионный режим горения, и горелки VG, создающей кинетический режим при равном расходе природного газа и кислорода. На рис. 3 представлены изменения концентраций  $\{CH_4\}$  (а),  $\{CO\}$  (б) и  $\{H_2\}$  (в) в поперечных сечениях продуктов сгорания по длине факелов горелок различных фирм и конструкций.

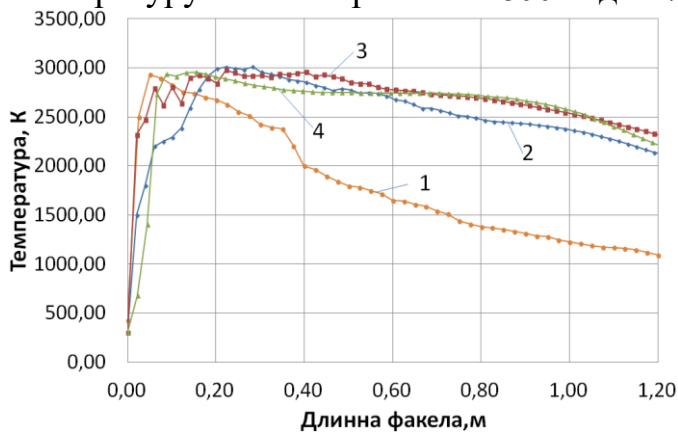


1 – горелка VG; 2 – горелка НТПФ «Эталон»; 3 – горелка VAI FUCHS; 4 – горелка SMS DEMAG  
Рисунок 3 – Изменение концентрации  $\{CH_4\}$  (а),  $\{CO\}$  (б) и  $\{H_2\}$  (в) по длине факела

Анализ процесса горения природного газа в атмосфере кислорода показывает, что концентрация горючих составляющих становится минимальной на расстоянии 100-200 мм (5-10 калибров  $l/d_{кр}$ ) от среза горелки VG по сравнению с другими конструкциями. Наиболее интенсивное выгорание горючих составляющих в факеле горелки VG подтверждается самой высокой температурой продуктов сгорания вблизи

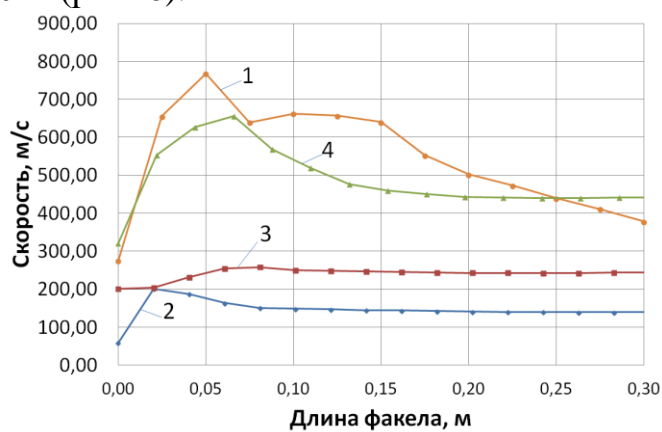
среза горелки (рис. 4), что обеспечивается высокой их скоростью (турбулентностью) при кинетическом режиме горения (рис. 5).

Проведено расчетное исследование зависимости температуры факела горелки VG при изменении концентрации кислорода в КВС от 20 до 95 масс. % с целью выбора рационального кинетического режима горения природного газа. Изменение концентрации кислорода во всем рассмотренном диапазоне повышает среднюю температуру в зоне горения с 1800 К до 2750 К (рис. 6).



1 – горелка VG; 2 – горелка НТПФ «Эталон»;  
3 – горелка VAI FUCHS; 4 – горелка SMS  
DEMAG

Рисунок 4 – Изменение температуры продуктов сгорания по длине факела



1 – горелка VG; 2 – горелка НТПФ «Эталон»;  
3 – горелка VAI FUCHS; 4 – горелка SMS  
DEMAG

Рисунок 5 – Изменение скорости продуктов сгорания по длине факела

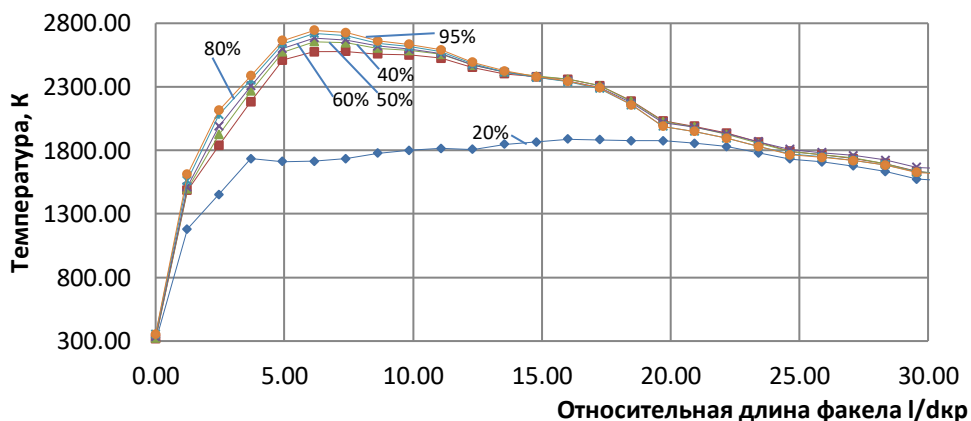


Рисунок 6 – Изменение средней температуры продуктов сгорания по длине факела от концентрации O<sub>2</sub> в КВС

Относительная длина по оси факела (калибр) представляет собой отношение длины по оси факела (l) к критическому диаметру сопла Лавалья (d<sub>кр</sub>). Установлено, что в пределах длины факела, равной 5d<sub>кр</sub> - 10d<sub>кр</sub>, средняя температура продуктов сгорания достигает максимального уровня с последующим снижением ее по длине факела и уменьшением концентрации кислорода в КВС.

Для определения максимальной температуры продуктов сгорания природного газа в зависимости от концентрации O<sub>2</sub> в КВС получено уравнение (1):

$$T_{\text{макс}} = 661,42 \cdot \ln(C_{O_2}) + 121,16 \text{ К}; \quad R^2 = 0,9576, \quad (1)$$

где, C<sub>O<sub>2</sub></sub> – концентрация кислорода в КВС, масс. %; R<sup>2</sup> – коэффициент детерминации, показывающий долю разброса зависимой переменной (T<sub>макс</sub>) относительно своего среднего.

По данным моделирования в программе Ansys 17.2 получено уравнение (2) для определения максимальной скорости продуктов сгорания природного газа в зависимости от концентрации  $O_2$  в КВС.

$$W = 371,63 \cdot \ln(C_{O_2}) - 211,8 \text{ м/с}; R^2 = 0,937. \quad (2)$$

С повышением концентрации кислорода в КВС от 40 до 95 % отмечается повышение средней скорости потока продуктов сгорания вследствие повышения температуры горения.

Изменение концентрации  $\{CH_4\}$ ,  $\{CO\}$ ,  $\{H_2\}$  в поперечных сечениях потока продуктов сгорания от концентрации  $O_2$  в КВС по длине факела горелки VG представлено на рис. 7.

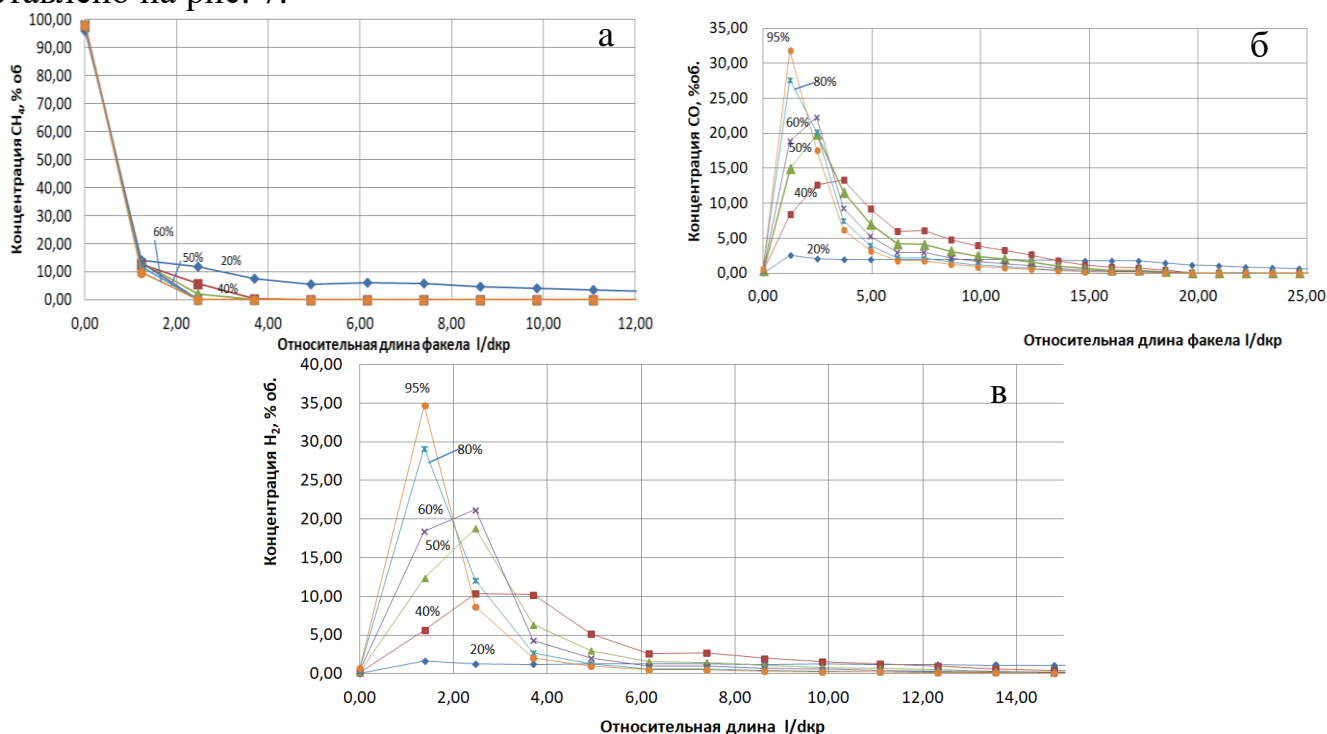


Рисунок 7 – Изменение максимальной концентрации  $\{CH_4\}$  (а)  $\{CO\}$  (б)  $\{H_2\}$  (в) в потоке продуктов сгорания при увеличении содержания  $O_2$  в КВС

Концентрация  $CH_4$  достигает нулевой величины в пределах 4  $l/d_{кр}$  факела, длина которого не превышает трех калибров критического диаметра, при концентрации  $O_2$  в КВС более 40 %. Повышение концентрации  $O_2$  от 50 до 95 % в КВС приводит к увеличению максимальной концентрации  $\{CO\}$  в продуктах сгорания, причем пиковые значения смещаются в сторону выходного отверстия горелки. По результатам компьютерного моделирования предложена зависимость для расчета максимальной массовой концентрации  $\{CO\}$  (уравнение (3)) и  $\{H_2\}$  (уравнение (4)) в продуктах сгорания в зависимости от концентрации  $O_2$  в КВС.

$$C_{CO} = 0,5588 \cdot C_{O_2} - 6,3929 \text{ масс. \%}; R^2 = 0,995; \quad (3)$$

$$C_{H_2} = 0,0479 \cdot C_{O_2} - 0,8559 \text{ масс. \%}; R^2 = 0,9963. \quad (4)$$

Теплофизические свойства продуктов сгорания природного газа с кислородом для горелки VG рассчитаны по программе Microsoft Excel 2016 и представлены уравнениями для расчета коэффициента теплопроводности, теплоемкости, температуропроводности и кинематической вязкости продуктов сгорания (уравнения (5)-(8), соответственно):

$$\lambda_{\text{пс}} = 0,0537 - 1 \cdot 10^{-5} \cdot C_{\text{O}_2}^2 + 0,0037C_{\text{O}_2} \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)} \quad R^2 = 0,9998, \quad (5)$$

$$C_{\rho_{\text{пс}}} = 1,2782 - 6 \cdot 10^{-5} \cdot C_{\text{O}_2}^2 + 0,0132C_{\text{O}_2} \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)} \quad R^2 = 0,9995, \quad (6)$$

$$a_{\text{пс}} = 0,0001 - 7 \cdot 10^{-8} \cdot C_{\text{O}_2}^2 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot C_{\text{O}_2} \text{ м}^2/\text{с} \quad R^2 = 0,9996, \quad (7)$$

$$v_{\text{пс}}^{t_d} = 0,00001 - 1 \cdot 10^{-7} \cdot C_{\text{O}_2}^2 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot C_{\text{O}_2} \text{ м}^2/\text{с} \quad R^2 = 0,9996. \quad (8)$$

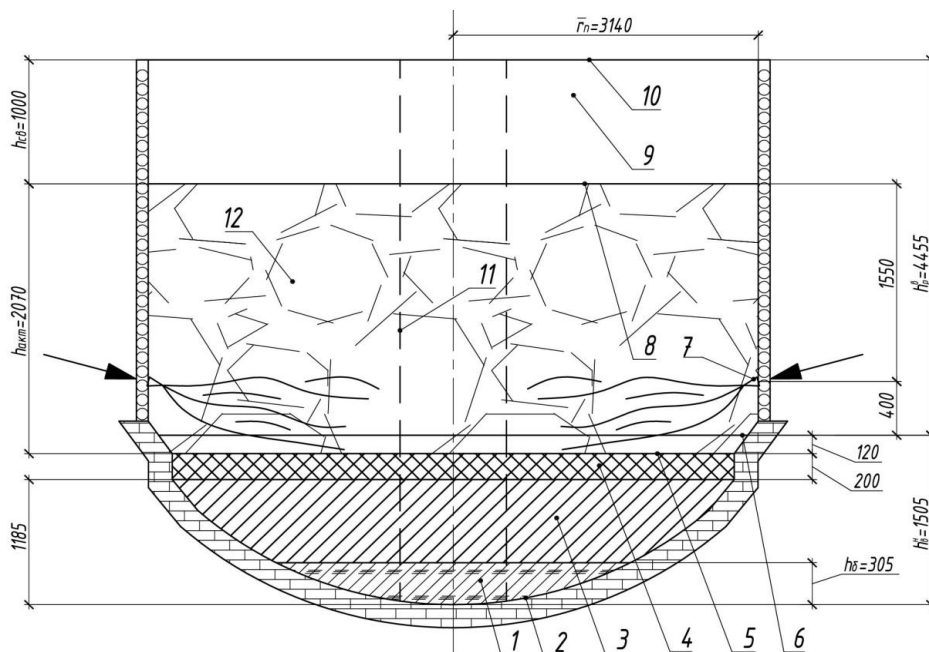
Следует отметить, что горелка VG, формирующая кинетический режим сжигания природного газа с кислородом, обеспечивает полное сжигание исходной смеси в начальном объеме шихтовых материалов и имеет преимущества перед диффузионными горелками.

В четвертой главе для оценки заполнения шихтой рабочего пространства печи введен показатель коэффициента заполнения объема рабочего пространства печи (уравнение (9))

$$K_3 = \frac{V_{\text{ш}}}{V_{\text{рп}}} = \frac{m_{\text{ш}}}{V_{\text{рп}} \cdot \bar{\rho}_{\text{ш}}^{\text{H}}}, \quad (9)$$

где,  $V_{\text{ш}}$  - объем шихтовых материалов,  $\text{м}^3$ ;  $V_{\text{рп}}$  - объем рабочего пространства,  $\text{м}^3$ ;  $m_{\text{ш}}$  - масса шихтовых материалов, кг;  $\bar{\rho}_{\text{ш}}^{\text{H}}$  - средняя насыпная плотность шихты,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

В качестве примера рассмотрена плавка полупродукта стали марки 35ГС на ДСП-120 при скрап-карбюраторном процессе, работающей без «болота», с закрытой дугой и с нагревом и плавлением шихты при сжигании природного газа с кислородно-воздушной смесью с угаром железосодержащих компонентов, равным 8,3 %. На рис. 8 представлена схема рабочего пространства ДСП-120.



- 1 - «болото»; 2 - контур продольного сечения рабочего пространства ДСП-120; 3 - слой жидкого металла (стали); 4 - слой шлака; 5 - зеркало ванны; 6 - уровень порога технологического окна, 7 - уровень установки ГКГ и КГ; 8 - уровень засыпи шихты; 9 - свободный объем над уровнем засыпи шихты; 10 - верхняя кромка рабочего пространства печи; 11 - условная поверхность, ограничивающая объем прямого теплового воздействия электрических дуг на шихту и расплав; 12 - активный объем рабочего пространства от уровня засыпи до дна пода

Рисунок 8 – Схема рабочего пространства ДСП-120



Коэффициент заполнения шихтой рабочего пространства рассчитан для четырех возможных вариантов. Первый вариант ( $K_3^п$ ) связан с загрузкой рабочего пространства шихтой массой  $m_{ш} = 130$  т одной корзиной ( $V_{рп} = 138$  м<sup>3</sup>) от дна пода до верхней кромки печи (рис. 8).

Второй вариант ( $K_3^р$ ) - предполагает заполнение рабочего пространства ( $V_{рп}$ ) шихтой при сохранении незаполненной его части ( $V_{св}$ ) от уровня засыпи шихты до верхней кромки печи (рис. 8). Такой вариант загрузки шихты следует считать рациональным, так как свободный объем над шихтой позволяет реализовать дожигание оксида углерода и водорода в процессе нагрева и плавления шихты в рабочем объеме печи.

В третьем варианте ( $K_3^в$ ) заполняется объем шихты равный объему ванны печи, включающий объем стали ( $V_{ст} = 19,5$  м<sup>3</sup>), шлака ( $V_{ш} = 5,19$  м<sup>3</sup>) и свободный объем над зеркалом ванны ( $V_{св} = 3,1$  м<sup>3</sup>) до уровня порога технологического окна.

Четвертый вариант ( $K_3^{1к}$ ) предполагает загрузку первой корзины, объем шихтовых материалов, в которой равен рациональному объему печи.

Результат расчета коэффициентов заполнения по разным вариантам (табл. 2) позволяет спрогнозировать одноразовую подачу всех материалов, равных по массе емкости печи ( $K_3 = 1,0$ ) с учетом угара. При средней насыпной плотности шихты 1,29 т/м<sup>3</sup> и более завалку можно производить одной корзиной, создавая свободное пространство над уровнем шихты высотой не менее одного метра.

Таблица 2 – Изменение коэффициентов заполнения шихтой рабочего пространства ДСП-120 в зависимости от средней насыпной плотности

Насыпная плотность шихты, т/м <sup>3</sup>	Коэффициент заполнения шихтой рабочего пространства печи, доли един.			
	Полный объем	Рациональный объем	Объем ванны	Рациональный объем массой первой корзины
$\bar{\rho}_{ш}^н$	$K_3^п = \frac{0,942}{\bar{\rho}_{ш}^н}$	$K_3^р = \frac{1,29}{\bar{\rho}_{ш}^н}$	$K_3^в = \frac{4,68}{\bar{\rho}_{ш}^н}$	$K_3^{1к} = \frac{0,74}{\bar{\rho}_{ш}^н}$
0,74	-	-	-	1,00
1,00	0,942	-	-	0,74
1,50	0,63	0,86	-	0,49
2,00	0,47	0,65	-	0,37
4,68	0,20	0,27	1,00	0,16

После завалки первой корзины шихту нагревают газом и электрической дугой до температур 1100-1350 °С и при содержании углерода в ней от 0,8 до 2,0 % металл становится пластичным. Средний коэффициент теплопроводности материалов, соответствующий первой корзине (по данным материального баланса при плавке стали 35ГС на ДСП-120) с учетом продуктов сгорания равен 29,35 Вт/(м·К).

Расчет среднего коэффициента теплопроводности материалов первой корзины показал, что на истинную теплопроводность шихты присутствие газовой среды не

оказывает существенного влияния (ошибка составляет не более 0,9 %). Эффективный коэффициент температуропроводности слоя шихтовых материалов составил  $37,11 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Таким образом, уточнены физические параметры и теплофизические свойства исходных материалов и комбинированного слоя шихты. Рассмотрены различные способы загрузки шихтовых материалов в рабочее пространство ДСП и выявлена рациональная загрузка за один прием с насыпной плотностью  $1,29 \text{ т/м}^3$ .

В пятой главе представлены результаты расчета материального, элементных по углероду, кислороду и теплового балансов. Статистическая обработка паспортов плавок ДСП-120 при выплавке скрап-карбюраторным процессом стали 35ГС с закрытой дугой, без «болота» и без передельного чугуна в шихте показала, что углерод кускового и пылевидного кокса в количестве 21,4 % (или 3,29 кг/т) перешел в расплав и 78,6 % его окислилось до {CO} и {CO<sub>2</sub>}. Неорганизованный подсос воздуха через технологическое окно при открытой заслонке на 15 % за период работы печи под током составил 11,35 % от общего прихода кислорода через газокислородные горелки, с компрессорным воздухом и флюсующими материалами. Затраты кислорода на горение природного газа при  $\alpha = 1,0$  составили 27,41 %.

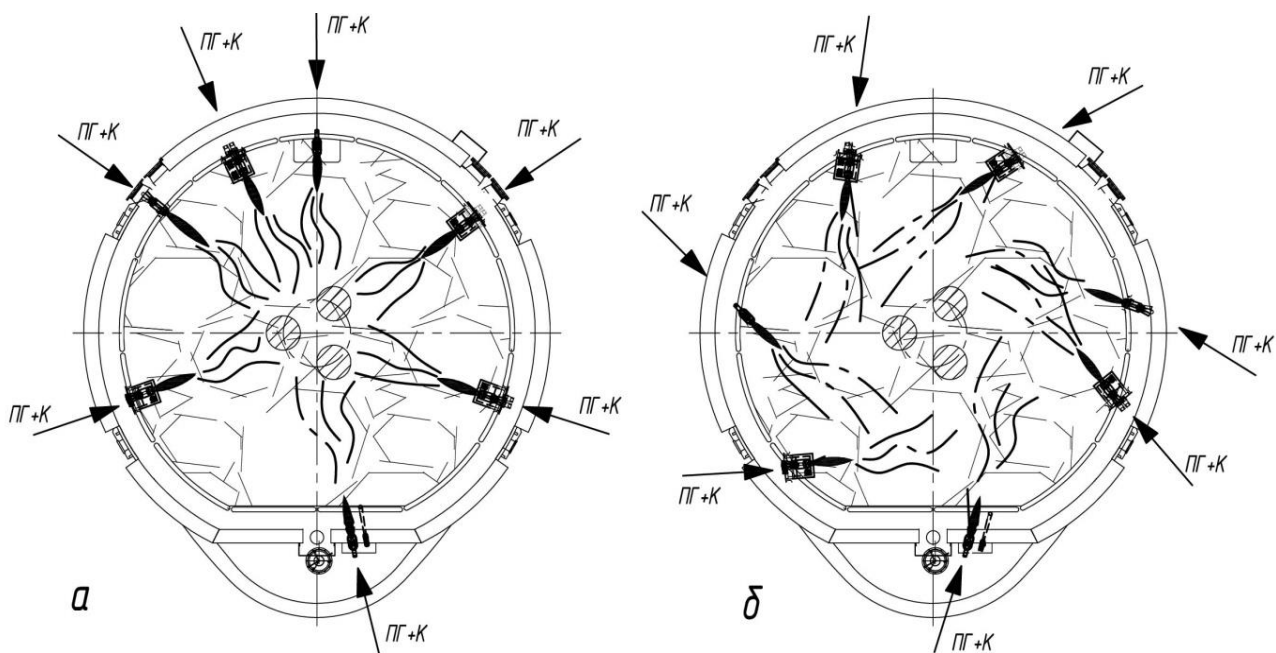
Тепловой баланс рабочего пространства, составленный за плавку от выпуска до выпуска, показал, что в приходной части основная доля тепловой энергии (52,01 %) приходится на электроэнергию и 9,07 % на теплоту горения природного газа. Приход теплоты от экзотермических реакций окисления углерода электродов, кускового и пылевидного кокса до {CO} и {CO<sub>2</sub>} (6,63 %) и угара железа до FeO и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (30,68 %) настолько значителен, что тепловой режим и технологический процесс в целом приобретают признаки автогенного. Содержание теплоты в дымовых газах с пылью и химическим недожогом в сумме составляет 17,04 %, что практически соизмеримо с потерей теплоты с водой (17,4 %), подаваемой на охлаждение рабочего пространства. Высокие потери с химическим недожогом при наличии достаточного содержания кислорода в дымовых газах свидетельствуют о неудовлетворительной организации газодинамических потоков в рабочем объеме печи.

Проведены исследования газодинамических потоков и температурных полей при радиальном и тангенциальном способах ввода компонентов горения газокислородными горелками, с целью выбора рациональной установки топливосжигающих устройств для равномерного распределения продуктов сгорания в объеме рабочего пространства печи. Расчет газодинамических параметров и температурных полей в рабочем пространстве ДСП-120 выполнен с использованием программы Solid Works Flow simulation. На рис. 9 представлена схема расположения топливосжигающих устройств и поверхности газодинамического воздействия продуктов сгорания.

Радиальное размещение горелок по варианту «а» приводит к крайне неравномерному распределению продуктов сгорания по рабочему объему печи (рис. 10 а). Скоростные и температурные поля показаны в горизонтальных сечениях, например, на уровне горелок (рис. 11 а и 12 а).

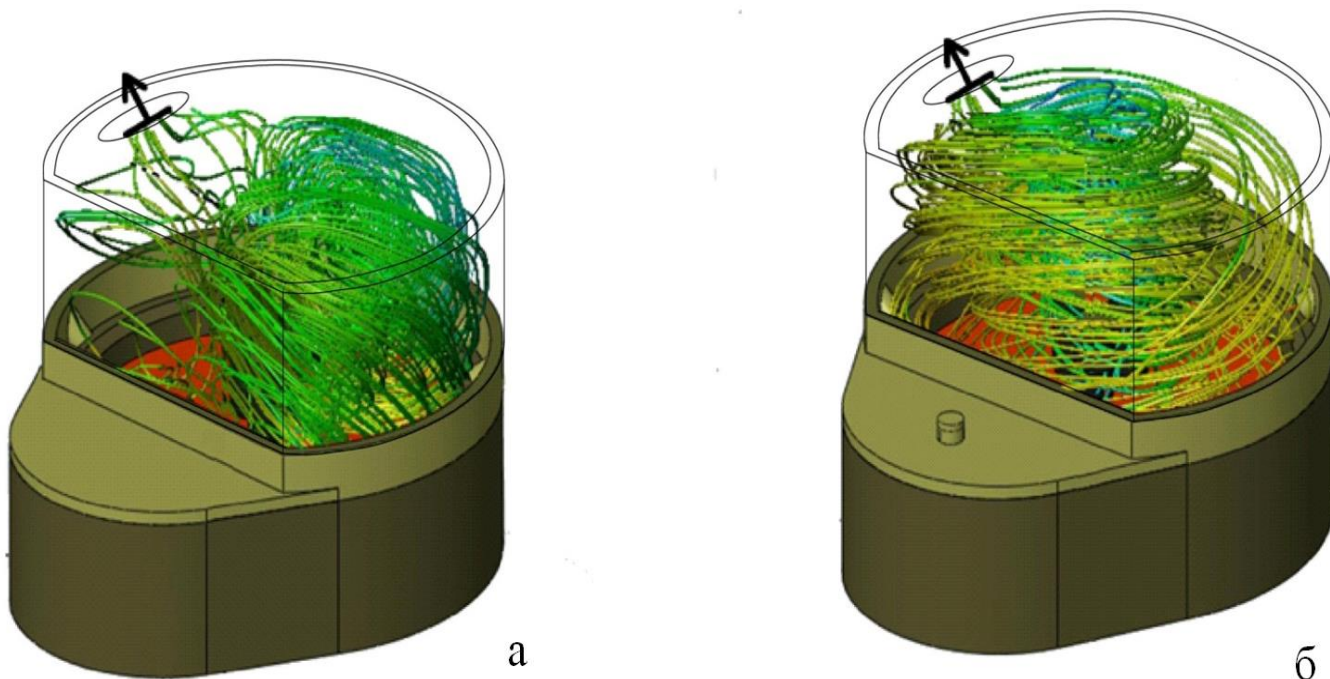
Радиально направленные факелы ГКГ формируют газодинамические потоки продуктов сгорания в высокотемпературную центральную зону печи, создавая их циркуляцию в вертикальной плоскости вблизи электродов. Поверхности электродов, обращенные в сторону факелов, подвергаются дополнительному разогреву и хими-

ческому воздействию направленным потоком высокотемпературных газов в присутствии кислорода, водяных паров, диоксида углерода и продуктов их диссоциации. Углерод электродов интенсивно окисляется и выгорает, в результате увеличивается их расход.



а – радиальное расположение горелок (на действующих печах);  
 б – тангенциальное расположение горелок (предлагаемый вариант).

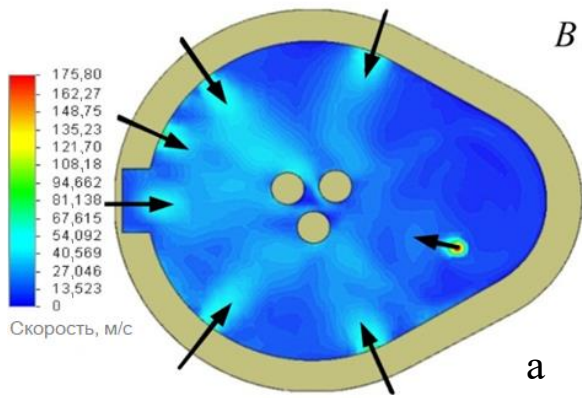
Рисунок 9 - Схема расположения комбинированных и газокислородных горелок в ДСП



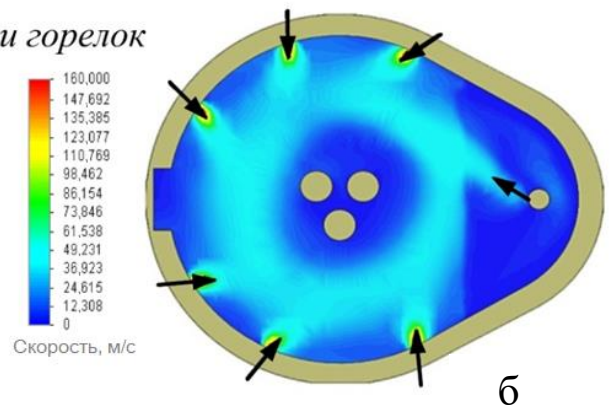
а – радиальное расположение горелок (на действующих печах);  
 б – тангенциальное расположение горелок (предлагаемый вариант).

Рисунок 10 - Траектории газовых потоков в объеме рабочего пространства печи



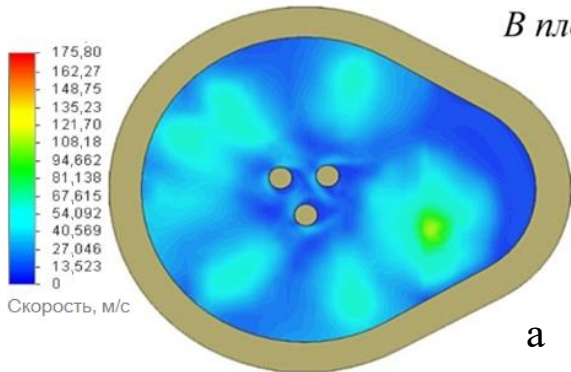


*В плоскости горелок*

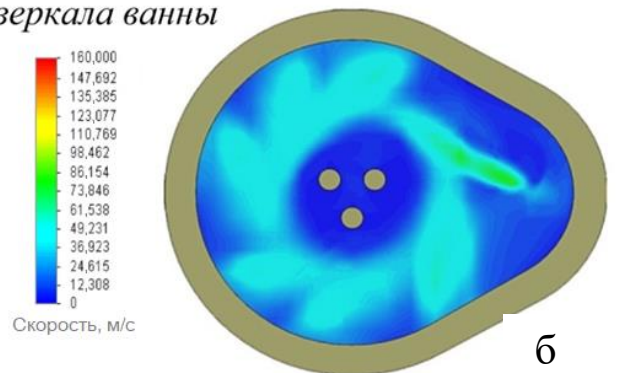


а

б



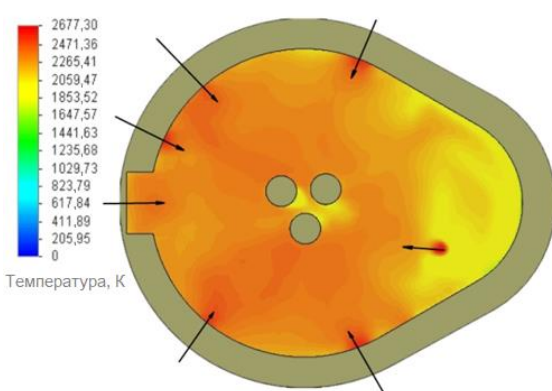
*В плоскости зеркала ванны*



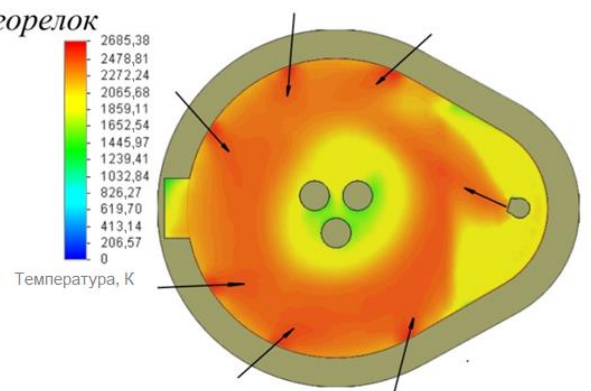
а

б

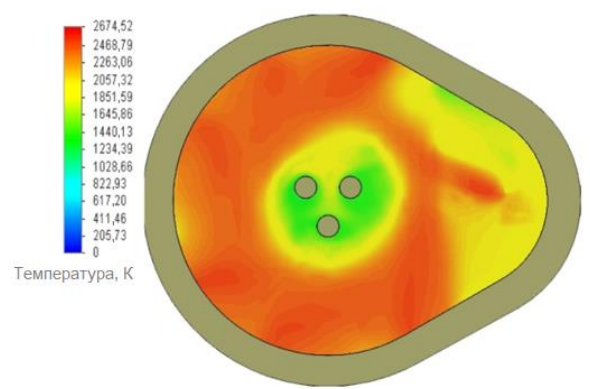
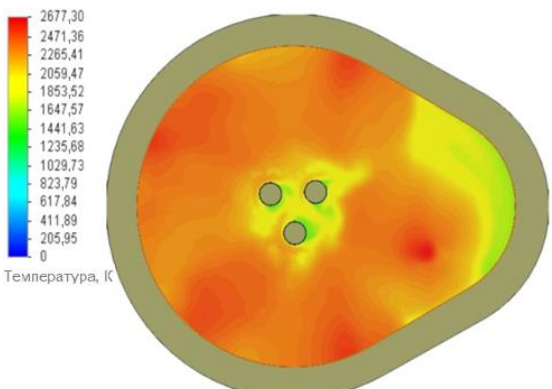
а – радиальное расположение горелок; б – тангенциальное расположение горелок.  
Рисунок 11 - Поле скоростей в горизонтальных сечениях рабочего пространства печи



*В плоскости горелок*



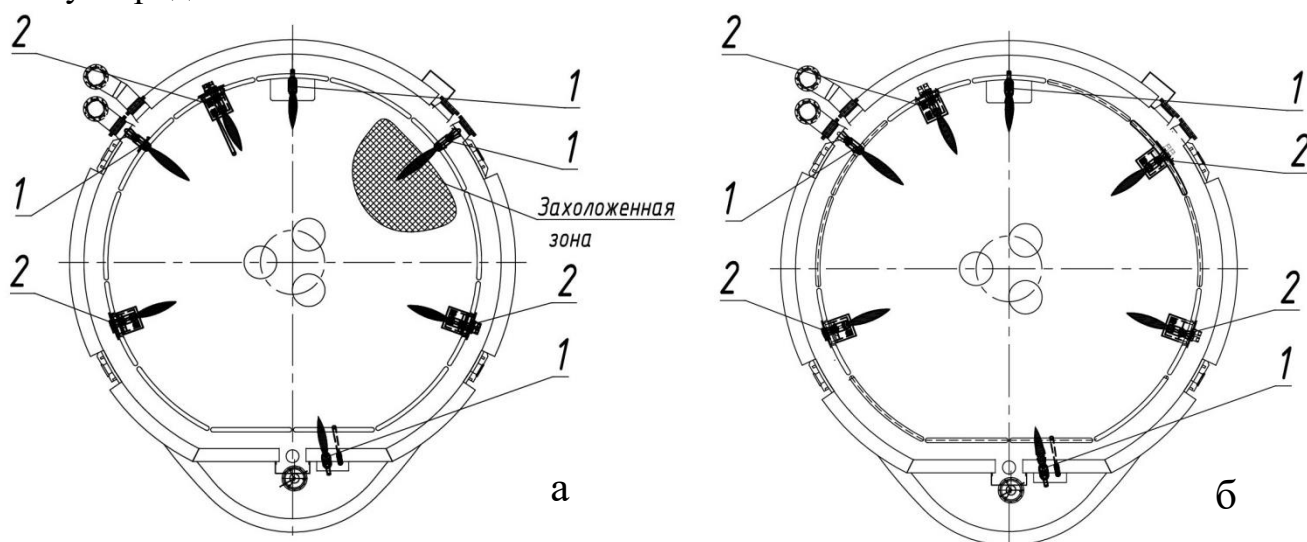
*В плоскости зеркала ванны*



а – радиальное расположение горелок; б – тангенциальное расположение горелок.  
Рисунок 12 - Поле температур в горизонтальных сечениях рабочего пространства печи

Горизонтальное движение продуктов сгорания увеличивает площадь активной поверхности, участвующей в теплообмене, создавая равномерный нагрев в объеме шихтовых материалов. Движение продуктов сгорания исключает направленное воздействие на поверхности электродов, повышая осаждение пыли в объеме печи на 25-27 % и снижая осаждение пыли на поверхность электродов почти в 10 раз. Неравномерный нагрев футеровки шлакового пояса при радиальной установке ГКГ приводит к возникновению настыли (рис. 13 а). Для устранения настыли в захламоженной зоне была произведена замена стеновой горелки 1 (рис. 13 а) на комбинированную горелку 2 (рис. 13 б). Замена горелки также обеспечила снижение электроэнергии на 3 (кВт·ч)/т.

Особенность теплообмена при нагреве холодной шихты состоит в том, что теплогенерация в объеме исходных материалов организуется за счет рассредоточенного по поперечному сечению шихты сжигания природного газа с кислородом и подачи электроэнергии переменной мощности и неконтролируемого процесса окисления углерода и железа в шихте.



1 – стеновые газокислородные горелки (СГКГ); 2 – комбинированные горелки (РГК).

Рисунок 13 – Схема установки стеновых газокислородных и комбинированных горелок до теплового перевооружения (а) и после (б)

В работе рассмотрены варианты расчета плотности теплового потока и коэффициента теплопередачи в объеме шихты, как при отсутствии, так и при образовании окалины в процессе нагрева и поверхностного плавления железосодержащих компонентов. Плотность потока теплоты (уравнения (10) и (11)), поступающей в шихту как до момента образования окалины ( $\bar{q}_k, \bar{q}_l$ ) так и при окислении металла ( $\bar{q}_{\text{ЭКЗ}}$ ) может быть определена

$$\bar{q}_{\Sigma}^{T+0} = \bar{q}_k + \bar{q}_{\text{эл}} + \bar{q}_{\text{ЭКЗ}}; \quad (10)$$

$$\bar{q}_{\Sigma}^{T+0} = \frac{\lambda_{\text{ПС}}^{\text{т}} \cdot \Delta t_{\text{ПС-Ш}} \cdot (F_{\text{акт}}^{\text{ра}})^2}{4(1-\rho_{\text{от}}) \cdot (V_{\text{акт}}^{\text{ра}})^2} + \frac{3,6 \cdot 10^6 \cdot Q_{\text{ЭЭ}}^{\text{теп}}}{V_{\text{ра}}^{\text{ш}} \cdot \Pi} + \frac{0,01 \cdot m_{\text{ш}}^{k-1} \cdot \gamma \cdot Q_{\text{М-МО}}}{V_{\text{ра}}^{\text{ш}} \cdot \Pi} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{с}} \quad (11)$$

где  $\bar{q}_k$  – средняя плотность конвективного теплового потока от продуктов сгорания к объему шихтовых материалов, Дж/(м<sup>3</sup> · с);  $\bar{q}_{\text{эл}}$  – средняя плотность теплового потока от электрической дуги к объему шихтовых материалов, Дж/(м<sup>3</sup> · с);  $\bar{q}_{\text{ЭКЗ}}$  – средняя плотность теплового потока от окисления железа до FeO и

$\text{Fe}_2\text{O}_3$ , Дж/(м<sup>3</sup> · с);  $\lambda_{\text{пс}}^{\bar{t}}$  – теплопроводность продуктов сгорания при средней температуре за период нагрева шихты, Дж/(м · с · К);  $\Delta \bar{t}_{\text{пс-ш}}$  – средняя разность температур между продуктами сгорания и шихтовыми материалами за период нагрева шихты, °С;  $F_{\text{акт}}^{\text{ра}}$  – суммарная активная поверхность, ограничивающая объем шихты, м<sup>2</sup>;  $V_{\text{акт}}^{\text{ра}}$  – активный объем шихты в рациональном объеме рабочего пространства печи, м<sup>3</sup>;  $\bar{\rho}_{\text{от}} = \frac{\bar{\rho}_{\text{н}}}{\bar{\rho}_0}$  – относительная плотность шихты, доли ед.;  $(1 - \bar{\rho}_{\text{от}}) = \Pi_{\text{ш}}$  – порозность в объеме шихтовых материалов, доли ед.;  $V_{\text{ра}}^{\text{ш}}$  – рациональный объем заполнения рабочего пространства шихтой, м<sup>3</sup>;  $Q_{\text{эп}}^{\text{теп}}$  – тепловая энергия дуги, МВт·ч;  $m_{\text{ш}}^{\text{к-1}}$  – масса железосодержащих материалов в шихте, кг;  $y$  – угар железа за плавку, %;  $Q_{\text{м-мо}}$  – тепловыделение при окислении железа, Дж/кг.

Средний суммарный коэффициент теплопередачи в объеме шихтовых материалов с учетом порозности (уравнение (12))

$$\bar{\alpha}_{\Sigma}^{\text{т+о}} = \frac{\bar{q}_{\Sigma}^{\text{т+о}}}{\bar{t}_{\text{ш}}} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{с} \cdot \text{°С}} \quad (12)$$

На рис. 14 приведена схема теплообмена при образовании окалины.

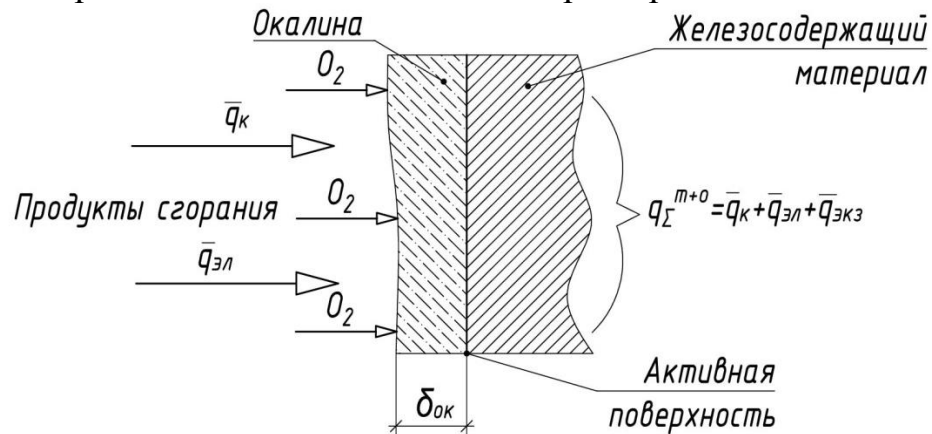


Рисунок 14 – Схема теплообмена при образовании окалины

Нагрев шихты первой корзины имеет свои особенности. Во-первых, нагревается не сплошное тело, а пористое, состоящее из многих существенно разнородных по физическим параметрам и теплофизическим свойствам материалов. Форма, размер, распределение материалов в объеме шихты способствуют образованию пустот, которые определяют порозность шихты. Во-вторых, следует разграничивать источники тепловой энергии на внешние (электроэнергия, природный газ) и внутренний, возникающий в результате окисления в основном углерода и железа.

Шихта в рабочем пространстве ДСП представлена в форме цилиндра, установленного вертикально на под сталеплавильной ванны. По мнению авторов Китаева Б.И., Телегина А.С., Зобнина Б.Ф. расчет нагрева шихты производят по методике нагрева неограниченного цилиндра при определяющем его размере, равном радиусу. Основная цель расчета нагрева шихты связана с определением времени ее нагрева. Для этого используется дифференциальное уравнение Фурье в критериальной форме, которое устанавливает зависимости относительной температуры массы шихты  $\theta_{\text{м}}$  от относительного размера шихты  $\bar{R}_{\text{опр}}$ ,  $Bi, Fo$ :  $\theta_{\text{м}} = f\left(\frac{x}{R}; Bi; Fo\right)$ . Учитывая особенности технологической и тепловой работы печи введена поправка на порозность шихты в определяющий размер критериев  $Bi$  (уравнение (15)) и  $Fo$ , в фи-

зические параметры и теплофизические свойства продуктов сгорания и массу шихтовых материалов.

Средний определяющий параметр шихты цилиндрической формы, расположенной в активном объеме рабочего пространства (уравнение (13))

$$\bar{R}_{\text{опр}} = \frac{4V_{\text{акт}} \cdot (1-\Pi)}{F_{\text{акт}}} = 0,37 \text{ м.} \quad (13)$$

Относительная температура массы шихты первой корзины (уравнение (14))

$$\theta_{\text{м}} = \frac{t_{\text{г}} - t_{\text{МК}}}{t_{\text{г}} - t_{\text{МН}}} = \frac{2659 - 1300}{2659 - 20} = 0,515, \quad (14)$$

где,  $t_{\text{г}} = t_{\text{д}}$  – расчетная температура продуктов сгорания природного газа с кислородом, °С.

$$\text{Число } Bi = \frac{\alpha_{\Sigma}^{\text{об}} \cdot \bar{R}_{\text{опр}}}{\lambda_{\text{тМК}}^{\text{тМК}}} \cdot \frac{V_{\text{ак}}^{\text{ра}}}{F_{\text{ак}}^{\text{ра}}} = \frac{654 \cdot 0,37 \cdot 64,12}{29,35 \cdot 69,41} = 7,62, \quad (15)$$

где,  $\alpha_{\Sigma}^{\text{об}}$  – объемный коэффициент теплопередачи в шихте первой корзины (уравнение (16), Дж/(м<sup>3</sup> · с · °С).

$$\alpha_{\Sigma}^{\text{об}} = \frac{Q_{\text{ш}}^{\text{к-1}}}{V_{\text{ра}}^{\text{ш}} \cdot \Delta t_{\text{ш}} \cdot \tau^{\text{к-1}}} = \frac{m_{\text{ш}}^{\text{к-1}} \cdot c_{\text{ш}}^{\text{тш}} \cdot t_{\text{ш}}^{\text{к}}}{V_{\text{ра}}^{\text{ш}} \cdot \Delta t_{\text{ш}} \cdot \tau^{\text{к-1}}} = \frac{81490 \cdot 786,49 \cdot 1300}{107,02 \cdot 1280 \cdot 930} = 654 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{с} \cdot \text{°С}} \quad (16)$$

Шихту первой корзины следует рассматривать как массивное в тепловом отношении тело.

Число Fo определено по диаграмме Будрина Д.В. и время нагрева шихты рассчитано по уравнению (17)

$$\tau_{\text{ш}} = \frac{Fo \cdot \bar{R}_{\text{опр}}^2}{a_{\text{тМК}}^{\text{тМК}}} = \frac{0,26 \cdot 0,37^2 \cdot 10^6}{37,11} = 959 \text{ с,} \quad (17)$$

где,  $a_{\text{тш}}^{\text{тш}}$  - температуропроводность шихтовых материалов первой корзины, м<sup>2</sup>/с;  $\tau_{\text{ш}}$  - время нагрева шихты, с.

Рассмотрены особенности теплообмена при нагреве шихтовых материалов в ДСП, определены плотности теплового потока и коэффициента теплопередачи в объеме шихтовых материалов без учета образования окалины, при образовании окалины и с учетом плавления железосодержащих компонентов. Выполнен расчет нагрева шихты первой корзины при образовании окалины. Расчетное время нагрева шихты по предложенной методике отличается на 6,8 % от действительного времени на печи, что позволяет сделать вывод о том, что данная методика может быть использована для других вариантов расчета в ДСП.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты диссертационной работы могут быть сформулированы в следующем представлении:

1. Разработана методика расчета горения природного газа с кислородом. Исследован и рекомендован тангенциальный способ установки горелок в рабочем пространстве печи вместо радиального, существующего на современных ДСП.

2. Рекомендован кинетический режим сжигания природного газа вместо диффузионного, для чего предложена горелка, обеспечивающая надежное горение природного газа с кислородом в диапазоне концентрации O<sub>2</sub> от 20 до 95 % в КВС без «проскока» факела в горелку и исключая горение исходного состава топлива в объеме шихтовых материалов.

3. Уточнены физические параметры и теплофизические свойства продуктов сгорания природного газа с кислородом и комбинированного слоя шихты с учетом его порозности при скрап-карбюраторном процессе в ДСП-120 при плавке полупродукта стали 35ГС.

4. Разработана методика расчета времени нагрева слоя комбинированной шихты с использованием дифференциального уравнения теплопроводности в критериальной форме.

#### **Перспективы дальнейшей разработки темы исследования**

Совершенствование скрап-карбюраторного процесса выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи при углубленном изучении теплообмена при нагреве и плавлении шихтовых материалов совместно электрической дугой и продуктами сгорания природного газа с кислородом. Дальнейшее изучение процессов диссоциации компонентов горения природного газа с учетом взаимодействия продуктов сгорания с УСМ и разработка способов устранения химического недожога в пределах рабочего пространства.

#### **Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:**

*статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом:*

1. Воронов, Г. В. Газодинамика в рабочем пространстве современной дуговой сталеплавильной печи / Г. В. Воронов, М. В. Антропов, **И. В. Глухов** // Новые огнеупоры. – 2014. – № 11. – С. 23–25; 0,195 п.л./0,065 п.л.

*Voronov, G. V. Gas Dynamics in the Working Space of a Modern Electric-Arc Steelmaking Furnace / G. V. Voronov, M. V. Antropov, I. V. Glukhov // Refractories and Industrial Ceramics. – 2015. – Vol. 55, № 6. – P. 498–500; 0,195 п.л./0,065 п.л. (Scopus/Web of Science).*

2. Воронов, Г. В. Температурное состояние в рабочем пространстве современной дуговой сталеплавильной печи / Г. В. Воронов, М. В. Антропов, О. В. Порох, **И. В. Глухов**, В. А. Гольцев // Новые огнеупоры. – 2015. – № 5. – С. 40–42; 0,245 п.л./0,05 п.л.

*Voronov, G. V. Temperature Conditions in the Working Space of a Modern Electric-Arc Steelmaking Furnace / G. V. Voronov, M. V. Antropov, O. V. Porokh, I. V. Glukhov, V. A. Gol'tsev // Refractories and Industrial Ceramics. – 2015. – Vol. 56, № 3. – P. 257–259; 0,245 п.л./0,05 п.л. (Scopus/Web of Science).*

3. Воронов, Г. В. Особенности аэродинамики и температурного поля в рабочем пространстве современной дуговой сталеплавильной печи / Г. В. Воронов, В. А. Гольцев, **И. В. Глухов** // Известия высших учебных заведений. – 2015. – № 58. – С. 645–651; 0,544 п.л./0,18 п.л.

*Voronov, G. V. Aerodynamics and temperature field within an arc smelting furnace / G. V. Voronov, V. A. Gol'tsev, I. V. Glukhov // Steel in Translation. – 2015. – Vol. 45, № 9. – 640–645; 0,544 п.л./0,18 п.л. (Scopus).*

4. Воронов, Г. В. Аэродинамика и тепловое состояние современной дуговой сталеплавильной печи / Г. В. Воронов, В. А. Гольцев, **И. В. Глухов** // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2016. – № 1. – С. 28–34; 0,6 п.л./0,2 п.л.

5. Воронов, Г. В. К вопросу о рациональной загрузке шихтовых материалов и расположении топливосжигающих устройств в ДСП-120 / Г.В. Воронов, В. А. Гольцев, **И. В. Глухов**, И. В. Плесокин // Черная металлургия. Бюллетень научнотехнической и экономической информации. – 2017. – № 4. – С. 45–49; 0,28 п.л./0,07 п.л.

6. Voronov, G. V. Single pellet heating in natural gas combustion products in mixture with air and oxygen / G. V. Voronov, **I. V. Glukhov** // Materials Science Forum. – 2020. – Vol. 989. – P. 480–485; 0,32 п.л./0,16 п.л. (Scopus).

7. Voronov, G. V. Specific features of thermal performance of the arc steel furnace in unstable properties conditions of burden materials / G. V. Voronov, **I. V. Glukhov** // Materials Science Forum. – 2020. – Vol. 989. – P. 486–491; 0,38 п.л./0,19 п.л. (Scopus).

8. **Глухов, И. В.** Энергосбережение в современной дуговой сталеплавильной печи ДСП-120 / **И. В. Глухов**, Д. В. Мехряков, Г. В. Воронов, К. М. Вдовин, А. А. Рыбак, В. В. Таранов // Сталь. – 2020. – № 5. – С. 21–23; 0,32 п.л./0,05 п.л.

9. Voronov, G. V (2020). Arc steel furnace operation at changing working space aerodynamic flows / G. V Voronov, **I. V. Glukhov**, I. V. Plesakin // Solid State Phenomena. – 2020. – Vol. 299. – P. 664–669; 0,4 п.л./0,13 п.л. (Scopus).

10. Voronov, G. V. Thermal and Physical Properties of Methane Family Hydrocarbon and Oxygen Combustion Products in State-of-the-Art Arc Steel Furnace / G. V. Voronov, **I. V. Glukhov** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. . – 2020. – Vol. 969, № 1; 0,38 п.л./0,19 п.л. (Scopus).

11. Voronov, G. V. Physicochemical Properties of Natural Gas and Oxygen Combustion Products at Diffusion and Kinetic Burning / G. V. Voronov, **I. V. Glukhov** // Lecture Notes in Mechanical Engineering : Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021) / eds. A. A. Radionov, V. R. Gasiyarov. – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 318–324; 0,38 п.л./0,19 п.л. (Scopus).

12. Voronov, G. V. Natural Gas Burning with Process Oxygen in Up-to-Date Arc Steel Furnace Operating Space / G. V. Voronov, **I. V. Glukhov** // Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021) : Lecture Notes in Mechanical Engineering / eds. A. A. Radionov, V. R. Gasiyarov. – Cham: Springer International Publishing, 2022. – P. 358–365; 0,38 п.л./0,19 п.л. (Scopus).

#### **Патенты:**

13. Патент 213773 РФ. Устройство для сжигания природного газа и кислорода: опубл. 28.09.2022 / Г. В. Воронов, **И. В. Глухов**, Л. А. Зайнуллин; заявитель и патентообладатель ОАО «ВНИИМТ». – Изобретения. Полезные модели. – Бюл. № 28. 2022. – 6с.

#### **Другие публикации:**

14. Воронов, Г. В. Особенности работы современной электродуговой сталеплавильной печи / Г. В. Воронов, М. В. Антропов, **И. В. Глухов** // Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология : тр. VII междунар. науч.-практ. конф. – Москва : МИСИС, 2014. – С. 129–132; 0,16 п.л./0,05 п.л.

15. Воронов, Г. В. Моделирование газодинамики рабочего пространства ДСП современной ДСП / Г. В. Воронов, М. В. Антропов, О. В. Порох, **И. В. Глухов**,

Л. А. Валишев // Инновации в материаловедении и металлургии : материалы IV Междунар. интерактив. науч.-практ. конф. – Екатеринбург : УрФУ, 2015. – С. 103–109; 0,23 п.л./0,06 п.л.

16. **Глухов, И. В.** Совершенствование аэродинамики в рабочем пространстве современной дуговой сталеплавильной печи / **И. В. Глухов**, Л. А. Валишев, Г. В. Воронов // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве : сб. докл. IV Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных с междунар. участием, посвящ. 95-летию основания каф. и у-та. – Екатеринбург : УрФУ, 2015. – С. 26–29; 0,21 п.л./0,07 п.л.

17. **Глухов, И. В.** Компьютерное моделирование и совершенствование аэродинамики в рабочем пространстве современной дуговой сталеплавильной печи / **И. В. Глухов**, Г. В. Воронов, В. А. Гольцев // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : материалы Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с междунар. участием. – Екатеринбург : УрФУ, 2015. – С. 88–91; 0,15 п.л./0,05 п.л.

18. Винтовкин, А. А. К вопросу о взрыве газов в печах и топках / А. А. Винтовкин, Г. В. Воронов, **И. В. Глухов**, С. А. Проданов // Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности : сб. докл. междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 95-летию основания каф. ТИМ, УрФУ и 85-летию основания ОАО «ВНИИМТ». – Екатеринбург : УрФУ, 2015. – С. 340–343; 0,15 п.л./0,04 п.л.

19. Воронов, Г. В. Аэродинамические и температурные поля в холодной зоне рабочего пространства современной дуговой сталеплавильной печи / Г. В. Воронов, В. А. Гольцев, **И. В. Глухов** // Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности : сб. докл. в междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 95-летию основания каф. ТИМ, УрФУ и 85-летию основания ОАО «ВНИИМТ». – Екатеринбург : УрФУ, 2015. – С. 244–251; 0,5 п.л./0,16 п.л.

20. Воронов, Г. В. Особенности тепловой работы современной дуговой сталеплавильной печи / Г. В. Воронов, В. А. Гольцев, **И. В. Глухов** // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. 100 лет отечественного проектирования металлургических печей : тр. VIII Междунар. науч.-практ. конф. – Москва : МИСИ, 2016. – С. 270–277; 0,29 п.л./0,1 п.л.

21. **Глухов, И. В.** Особенности температурного поля в рабочем пространстве современной дуговой сталеплавильной печи / **И. В. Глухов**, Г. В. Воронов, И. В. Плесакин // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве : сб. докл. V Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2016) с междунар. участием. – Екатеринбург : УрФУ, 2016. – С. 19–23; 0,15 п.л./0,05 п.л.

22. **Глухов, И. В.** Тепловое состояние ДСП-120 при загрузке и нагреве слоя шихты / **И. В. Глухов**, Г. В. Воронов, В. А. Гольцев, И. В. Плесакин // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве : сб. докл. VI Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2017) с междунар. участием. – Екатеринбург : УрФУ, 2017. – С. 17–22; 0,37 п.л./0,09 п.л.



23. Плесакин, И. В. Рекомендации по загрузке шихты и расположению топливосжигающих устройств в дуговой сталеплавильной печи ДСП-120 / И. В. Плесакин, Г. В. Воронов, **И. В. Глухов** // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве : сб. докл. VI Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2017) с междунар. участием. – Екатеринбург : УрФУ, 2017. – С. 98–102; 0,21 п.л./0,07 п.л.

24. Левачева, К. П. Разработка теплового режима дуговой сталеплавильной печи, работающей с использованием природного газа в качестве теплового носителя / К. П. Левачева, Г. В. Воронов, Е. Е. Кузнецова, **И. В. Глухов** // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве : сб. докл. VII Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2018) с междунар. участием. – Екатеринбург: ООО АМК «День РА», 2018. – С. 190–198; 0,44 п.л./0,11 п.л.

25. Кузнецова, Е. Е. Образование СО в ДСП–80 при скрап-рудном процессе, работающей с использованием природного газа / Е. Е. Кузнецова, Г. В. Воронов, К. П. Левачева, **И. В. Глухов** // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве : сб. докл. VII Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2018) с междунар. участием. – Екатеринбург: ООО АМК «День РА», 2018. – С. 174–181; 0,4 п.л./0,1 п.л.

26. Плесакин, И. В. Анализ процесса дожигания монооксида углерода в рабочем пространстве современной дуговой сталеплавильной печи / И. В. Плесакин, Г. В. Воронов, **И. В. Глухов** // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве : сб. докл. VII Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2018) с междунар. участием. – Екатеринбург: ООО АМК «День РА», 2018. – С. 255–259; 0,22 п.л./0,07 п.л.

27. **Глухов, И. В.** Геометрические параметры компонентов комбинированной шихты дуговой сталеплавильной печи / И. В. Глухов, Г. В. Воронов // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве : сб. докл. VIII Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2019) с междунар. участием. – Екатеринбург: ООО АМК «День РА», 2019. — С. 40–43; 0,2 п.л./0,1 п.л.

28. **Глухов, И. В.** Сжигание природного газа с технологическим кислородом в рабочем пространстве современной дуговой сталеплавильной печи / И. В. Глухов, Г. В. Воронов // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве : сб. докл. IX Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2021) с междунар. участием. – Екатеринбург: УрФУ, 2021. – С. 28–34; 0,2 п.л./0,1 п.л.