

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

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

выпускной квалификационной работы:

Разработка энергосберегающей технологии выплавки стали в дуговой  
сталеплавильной печи  
(тема)

ОБУЧАЮЩИЙСЯ \_\_\_\_\_ Сафонов С. О.  
(подпись) (фамилия, имя, отчество)

допущен к защите в государственной экзаменационной комиссии «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Руководитель к.т.н. доцент \_\_\_\_\_ Уманский А. А.  
(уч. степень, звание) (подпись) (фамилия, имя, отчество)

Заведующий кафедрой к.т.н. доцент \_\_\_\_\_ Калиногорский А. Н.  
(уч. степень, звание) (подпись) (фамилия, имя, отчество)

Директор института  
Имим д.т.н. профессор \_\_\_\_\_ Галевский Г. В.  
(наименование института) (уч. степень, звание) (подпись) (фамилия, имя, отчество)

Новокузнецк  
2020 г.

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

Кафедра металлургии черных металлов

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ Калиногорский А. Н.

(подпись)

(ФИО)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

### ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную работу

обучающегося Сафонова С. О.

(фамилия, имя, отчество)

группы МММ-18

Тема работы Разработка энергосберегающей технологии выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи

Утверждена приказом от \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_

Характер работы \_\_\_\_\_

(прикладное научное исследование, экспериментальная разработка, аналитическая работа, ОКР)

Срок сдачи обучающимся законченной работы « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Исходные условия и данные к работе учебные пособия, монографии, справочники, периодическая литература, диссертационные исследования, научная литература и статьи по теме исследования

Цель, задачи работы: Разработка с использованием результатов теоретических и экспериментальных исследований выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи с применением газокислородных горелок, подогревателей металлического лома, дожиганием отходящих газов кислородной фурмой, энергосберегающей технологии; анализ современных технологических решений при выплавке стали; определение доминирующих тенденций и перспектив, обоснование и выбор приоритетных направлений исследования.

Содержание работы: Энергосберегающие технологии: Жидкий старт; Предварительный подогрев лома; Подогрев лома на специальных установках; Подогреватель лома системы VERTICON; ДСП с простым шахтным подогревателем; Двухкорпусная печь с шахтным подогревом; Шахтные печи с удерживающими пальцами; Двухкорпусная ДСП; Технология Consteel; Применение

топливно-кислородных горелок; Эркеры и стеновые HPR-горелки; Оконные горелки; Сводовые горелки; Использование химической энергии газов; Работа на вспененном шлаке.

Анализ процесса плавления металлолома: Механизм плавления металлолома; Исследование термодинамики и кинетики растворения лома в железоуглеродистом расплаве.

Разработка энергосберегающей технологии: Анализ энергоэффективности технологии Consteel; Анализ эффективности применения топливно - кислородных горелок; Анализ эффективности процесса дожигания газов; Эффективная энергосберегающая технология.

Предполагаемое использование результатов: Результаты выпускной квалификационной работы могут быть использованы при написании статей и в магистерской работе, а также при внедрении энергосберегающих технологий выплавки стали в ДСП на металлургическом предприятии

Перечень графического материала: титульный лист презентации – 1 слайд; современные энергосберегающие технологии– 3 слайда; цель и задачи выпускной квалификационной работы – 1 слайд; структурно-логическая схема работы – 1 слайд; кинетика и термодинамика плавления металлического лома – 1 слайд; анализ эффективных энергосберегающих технологий – 1 слайд; схема предлагаемой энергосберегающей технологии – 1 слайд; экспериментальное исследование плавления металлического лома в жидком болоте – 1 слайд; за; заключение – 1 слайд.

Консультанты по работе с указанием относящихся к ним разделов работы

---

---

---

---

---

---

---

---

Нормоконтроль \_\_\_\_\_

---

Руководитель \_\_\_\_\_  
(подпись)

Задание к исполнению принял \_\_\_\_\_ « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.



## **Аннотация**

Разработка энергосберегающей технологии выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи. Выпускная квалификационная работа по направлению подготовки 22.04.02 «Металлургия» – Новокузнецк, 2020 – 83 с. Таблицы 15, иллюстраций – 37, источников – 40, формул - 9.

Цель работы - теоретическое обоснование оптимальной энергосберегающей технологии выплавки стали в дуговой электропечи.

Разработана выпускная квалификационная работа, включающая в себя исследование термодинамики и кинетики растворения лома в железоуглеродистом расплаве, и разработка на основе его результатов, энергосберегающей технологии выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи.

В выпускной квалификационной работе рассмотрены проектные решения для совершенствования технологии плавки стали в дуговой сталеплавильной печи. Для достижения поставленной цели в проекте предусматривается применение: подогревателя лома Consteel, эркерных и оконных поворотных газокислородных горелок, дожигание отходящих газов топливно – кислородной фурмой.

Исполнитель

С.О. Сафонов

## Abstract

Development of energy – saving technology for steelmaking in an electric arc furnace. Final qualification work in the direction of preparation 04/22/02 "Metallurgy" - Novokuznetsk, 2020 - 83 p. Tables 15, illustrations - 37, sources – 40, formulas - 9.

The purpose of the work is a theoretical justification of the optimal energy-saving technology for steel smelting in an electric arc furnace.

The final qualification work has been developed, which includes the study of the thermodynamics and kinetics of dissolution of scrap in an iron-carbon melt, and the development of energy-saving technology for steel smelting in an arc steel furnace based on its results.

In the final qualifying work, design solutions for improving the technology of steel melting in an arc steel furnace were considered. To achieve this goal, the project provides for the use of: Consteel scrap heater, bay window and window rotary oxy-fuel burners, flue gas afterburning with a fuel and oxygen lance.

Performer

S. O. Safonov

## Содержание

Введение .....	9
1 Энергосберегающие технологии .....	10
1.1 Жидкий старт .....	10
1.2 Предварительный подогрев лома .....	15
1.2.1 Подогрев лома на специальных установках .....	16
1.2.2 Подогреватель лома системы VERTICON .....	24
1.2.3 ДСП с простым шахтным подогревателем.....	28
1.2.4 Двухкорпусная печь с шахтным подогревом .....	29
1.2.5 Шахтные печи с удерживающими пальцами .....	30
1.2.6 Двухкорпусная ДСП .....	34
1.2.7 Технология Consteel.....	35
1.3 Применение топливно-кислородных горелок .....	40
1.3.1 Эркеры и стеновые HPR-горелки .....	41
1.3.2 Оконные горелки.....	42
1.3.3 Сводовые горелки .....	43
1.4 Использование химической энергии газов .....	44
1.5 Работа на вспененном шлаке.....	46
1.6 Выводы .....	48
2 Анализ процесса плавления металлолома .....	51
2.1 Механизм плавления металлолома.....	51
2.2 Исследование термодинамики и кинетики растворения лома в железоуглеродистом расплаве .....	58
2.3 Выводы .....	62
3 Разработка энергосберегающей технологии .....	63
3.1 Анализ энергоэффективности технологии Consteel .....	63
3.2 Анализ эффективности применения топливно - кислородных горелок.....	65
3.3 Анализ эффективности процесса дожигания газов .....	68
3.4 Эффективная энергосберегающая технология.....	70
3.5 Технико – экономическое обоснование энергосберегающей технологии ..	75

3.6 Выводы .....	77
Заключение.....	78
Список использованной литературы.....	79



## Введение

Энергосбережение дает одну из наиболее перспективных возможностей для промышленности способствовать облегчению общей энергетической ситуации и соответствующий метод противодействия росту затрат на энергию. Руководители промышленных предприятий, как правило, знакомы с существующей энергетической проблемой, в связи с чем они весьма охотно воспринимают методы, позволяющие обеспечить энергосбережение. Однако необходимо добиваться более точного учета специфических возможностей энергосбережения руководителями крупных фирм, специалистами предприятий, консультантами и торговыми агентствами, представляющими промышленные предприятия.

В краткосрочной перспективе путем применения уже существующих технологических методов, которые экономически оправданы, может быть сэкономлено ~ 35% энергии, расходуемой в промышленных процессах. Прогнозируемый рост цен на топливо, как ожидают, сделает меры по энергосбережению еще более привлекательными в будущем. В долгосрочной перспективе в результате изобретения более эффективных устройств и разработки более эффективных технологических процессов, а также утилизации в более крупном масштабе отходящего тепла промышленность имеет возможность сэкономить более чем 25 % энергии.

Несмотря на то что энергосбережение не является панацеей от всех бед при решении энергетической проблемы, он дает нам возможность внедрить в практику хорошие технологические процессы, которые мы должны осуществлять независимо от того, решается или не решается энергетическая проблема.

# 1 Энергосберегающие технологии

## 1.1 Жидкий старт

Одним из способов увеличения производительности и энергосбережения является работа на жидком остатке 20% и более от массы плавки. Жидкий старт позволяет ускорить режим проплавления металлического лома за счет физического тепла металлической и шлаковой массы. Процесс наведения шлака при такой технологии начинается значительно раньше, тем самым улучшается теплофизическая составляющая плавки.

В последние года при традиционной выплавке стали в дуговой сталеплавильной печи доля болота достигает 22% а в шахтных печах или печах с подогревателем Consteel до 50% что является большим достижением в повышении производительности агрегатов.

Нижеприведенные данные взяты из статьи: «Влияние массы жидкого остатка на эксплуатационные показатели ДСП», авторы: Белковский Александр Георгиевич, Кац Яков Львович, ОАО АХК «ВНИИМЕТМАШ» имени академика А. И. Целикова. Россия, Москва.

Сначала влияние массы болота в печах с различными способами загрузки шихты исследовали на разработанной авторами детерминированной динамической математической модели процесса выплавки полупродукта в ДСП. В качестве моделируемого агрегата была выбрана ДСП - 30 ГУП «ЛПЗ» (г. Ярцево) при следующих допущениях:

- моделируемая плавка произвольно расположена в середине очень длительной серии без внеплановых простоев между отдельными плавками;
- температура болота перед началом каждой моделируемой плавки одинаковая (вне зависимости от массы болота);
- температура выпуска металла во всех численных экспериментах одинаковая;

- требуемое содержание углерода и фосфора получают всегда раньше требуемой температуры, т.е. продолжительность плавки определяется временем достижения заданной температуры выпуска;
- при моделировании ДСП с непрерывной загрузкой лома скорость загрузки не лимитирует время плавки (она, по крайней мере, не меньше скорости плавления) [1];
- точных данных по температуре предварительного нагрева лома в процессе Consteel нет, поэтому температура лома в обоих случаях принята равной температуре окружающей среды.

Долю болота в процессе моделирования изменяли от 0 до 0,8 от максимальной массы жидкого металла в печи (около 48,3 т). Энергетический режим и расчетное изменение температуры металла при моделировании одной из плавков представлены на рис. 1.1, результаты моделирования – на рис. 1.2.

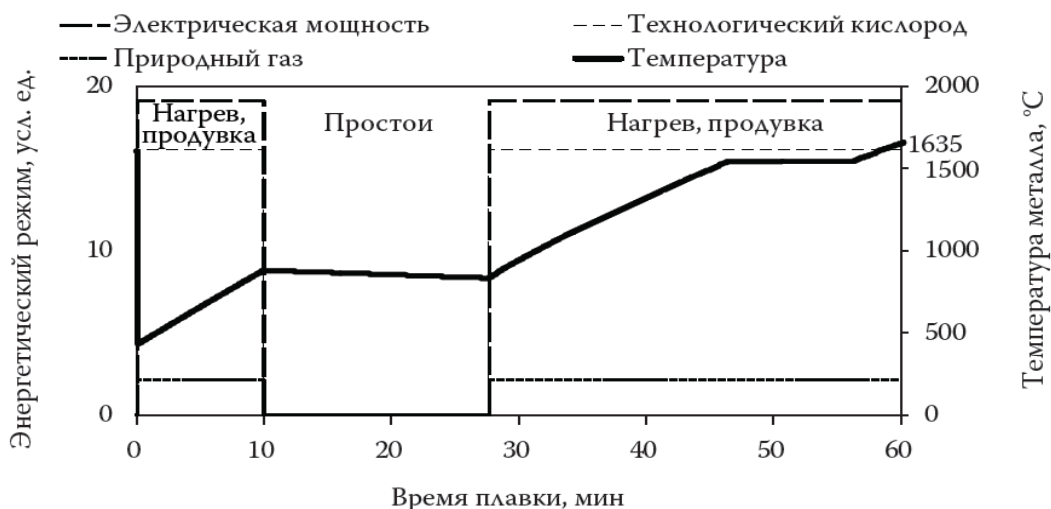


Рисунок 1.1 – Энергетический режим и расчетное изменение температуры металла при моделировании плавки в ДСП с верхней загрузкой и долей болота 0,2 от номинальной вместимости печи

Моделирование процесса Consteel отличалось от моделирования печи с верхней загрузкой только тем, что была сокращена продолжительность подготовительных операций за счет времени загрузок. Различие условий теплопередачи в рабочем пространстве печей не учитывалось. Согласно расчетам

по разработанной модели, увеличение массы болота в ДСП приводит к увеличению расхода электроэнергии и снижению производительности агрегата вне зависимости от способа загрузки шихты.

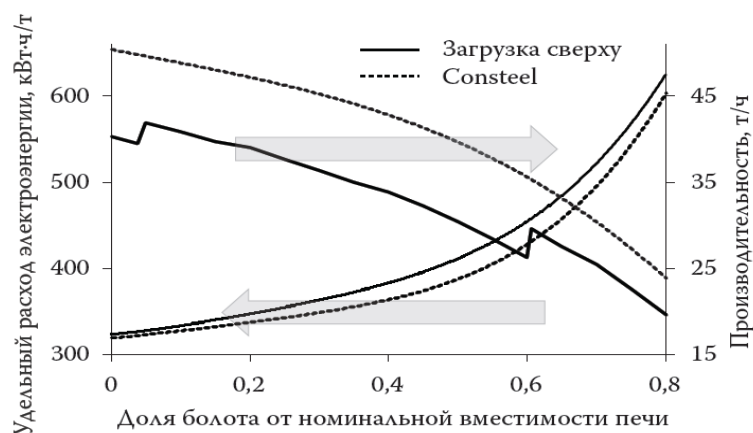


Рисунок 1.2 – Влияние доли болота на производительность и удельный расход электроэнергии в ДСП-30 (расчетные данные)

Действительно, производительность печи ( $G$ , т/ч) упрощенно можно представить в виде зависимости:

$$G = \frac{g_{пл}}{\tau_{const} + \tau_{var}} = \frac{g_{пл}}{\tau_{const} + g_{пл} \frac{W_{ту}}{P_{п}}} = \frac{1}{\frac{\tau_{const}}{g_{пл}} + \frac{W_{ту}}{P_{п}}} \quad (1)$$

Где  $g_{пл}$  – масса плавки, т;  $\tau_{const}, \tau_{var}$  – постоянная (суммарное время пауз) и переменная (время энергетического периода, который лимитируется продолжительностью нагрева) составляющие продолжительности плавки, ч;  $W_{ту}$  – удельный теоретический расход энергии для расплавления лома и нагрева металла до температуры выпуска, кВт·ч/т;  $P_{п}$  – полезная мощность всех источников тепла, кВт.

Проанализировав уравнение (1) приходим к следующим выводам:

1. если условия теплопередачи идентичны от источника тепловой энергии к шихтовым материалам и ограничении времени плавки продолжительностью нагрева и расплавления шихты (принятое допущение  $\tau_{с} = \tau_{var}$ , где  $\tau_{с}$  – продолжительность энергетического периода) с ростом процентной массы болота производительность дуговой сталеплавильной печи всегда уменьшается;

2. увеличение производительности дуговой сталеплавильной печи с порционной загрузкой шихты при увеличении массы болота связано с уменьшением общей продолжительности загрузки лома при уменьшении числа операций загрузки;

3. увеличение производительности и уменьшение расхода энергии в ДСП при увеличении массы болота может быть связано: с уменьшением продолжительности обезуглероживания при разбавлении углерода, содержащегося в ломе, металлом болота (но только при  $\tau_3 \neq \tau_{var}$ ), с улучшением условий теплопередачи от источников тепла к нагреваемой шихте, с взаимным влиянием первого и второго факторов. На рисунке 1.3 приведены производительности от массы болота.

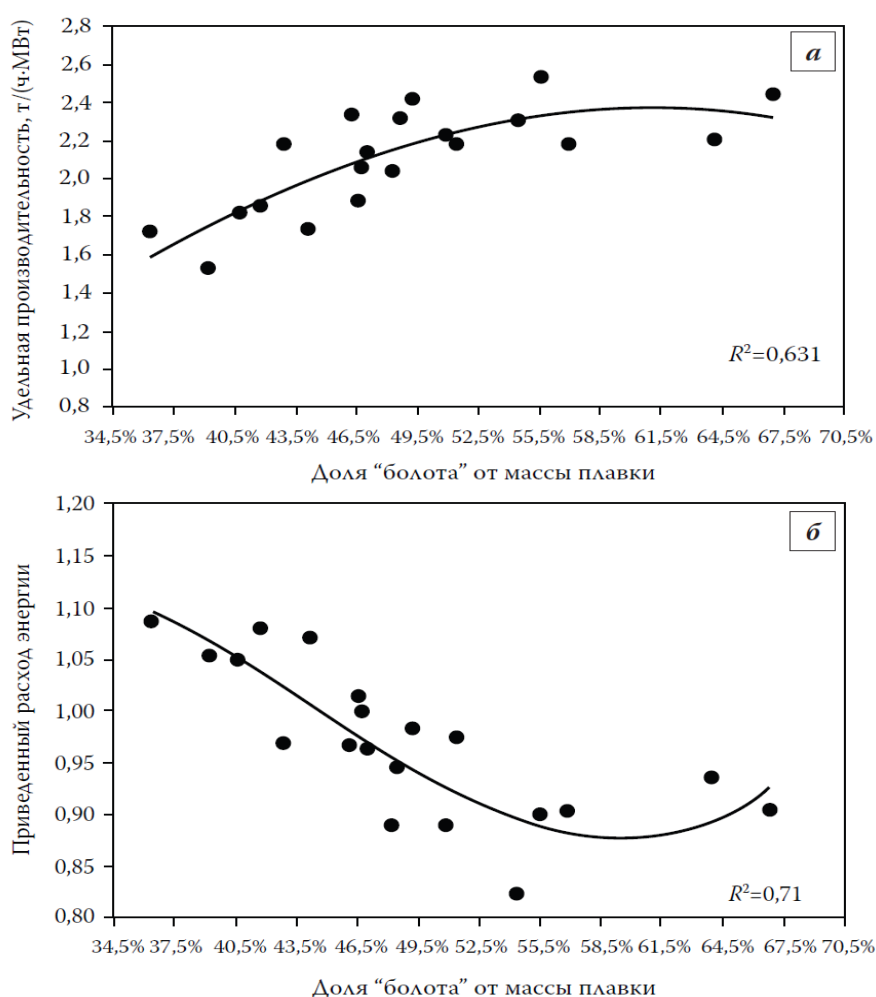


Рисунок 1.3 - Влияние массы болота на удельную производительность (а) и приведенный расход энергии (б). Удельная производительность – часовая производительность, отнесенная к 1 МВт активной мощности трансформатора; приведенный расход энергии 1,00 соответствует 365 кВт·ч/т электроэнергии и 36 м<sup>3</sup>/т кислорода (на годную заготовку)

Обобщая вышеизложенное, можно сделать следующие выводы:

1. Часовая производительность печи от массы жидкого болота показал, что при идентичных условиях тепло - массообмена при увеличении массы жидкого болота производительность дуговой сталеплавильной печи всегда уменьшается

2. Проанализировав дуговые печи с порционной и непрерывной загрузкой лома было выявлено, что скорость прогрева металлической шихты и ее плавления при непрерывной подаче металлического лома в жидкое болото ( $\approx 100$  раз).

3. Потери тепловой энергии которые происходят при бурном контакте металлического лома и жидкого болота в связи с конвективным теплообменом, необходимо восполнять внешними источниками энергии.

4. Процентное соотношение массы болота от садки печи определяется исходя из мощности трансформатора печи на предприятии, внешних источниках тепловой энергии и способа загрузки лома. Перспективна непрерывная загрузка металлической шихты, она имеет такие достоинства как: уменьшение простоев, равномерная загрузка дающая возможность протекания диффузионных процессов между ломом и болотом, увеличение производительности агрегата [2].

## **1.2 Предварительный подогрев лома**

Идея предварительного подогрева исходного сырья не нова и различные варианты ее довольно длительное время разрабатываются и применяются практически во всех металлургических процессах, связанных с выходом высококалорийных газов, имеющих повышенную температуру. Все разработанные и предложенные способы можно условно разделить на 2 группы:

1) подогрев лома на отдельно расположенном участке в завалочной корзине или в конвейере за счет тепла сгорания природного газа и за счет газов, отходящих из печи;

2) единая конструкция ДСП – подогреватель лома [3].

Дуговые сталеплавильные печи являются мощным потребителем электроэнергии, при этом доля расходов на электроэнергию в себестоимости

стали доходит до 25 %.

Один из способов уменьшения расхода электроэнергии – предварительный подогрев лома перед его загрузкой в печь. Так, например, если каким-либо образом удастся нагреть лом до 800 °С, то это увеличит его энтальпию на

$$\Delta H = C(t - t_0) = 0,194(800 - 20) = 174,4, \text{ кВт ч/т,}$$

где  $C = 0,194$  – средняя теплоемкость углеродистой стали в интервале 0 – 800 °С, кВт ч/(т град);

$t$  и  $t_0$  – соответственно температура подогретого и холодного лома, °С.

На эти 174,4 кВт ч уменьшится расход электроэнергии, необходимой для расплавления 1 т лома. Экономия же электроэнергии при тепловом КПД печи, равном, например, 0,8, составит  $174/0,8 = 217$  кВт ч/т – внушительная величина, поскольку расход электроэнергии на расплавлении обычно составляет 410 – 430 кВт ч/т. Продолжительность расплавления при неизменной мощности трансформатора после такого нагрева сократится почти наполовину, что обязательно даст и экономию электродов.

Однако нагреть лом до 800°С технически сложно. На практике ограничиваются нагревом до 200 – 300°С: при низкотемпературном подогреве операцию можно проводить в обычных загрузочных бадьях, в то время как при высокотемпературном нагреве требуются специальные бадьи, футерованные огнеупорами или изготовленные из жаростойкой стали; можно подогревать стружку и тонколистовой лом не опасаясь их чрезмерного окисления и спекания. При низкотемпературном нагреве экономия электроэнергии, естественно, меньше.

В таблице 1.1 приведены величины полезно вносимого тепла при различных температурах нагрева лома, с помощью которых можно оценить экономию электроэнергии в зависимости от теплового КПД конкретной печи [4].

Таблица 1.1 – Величины полезно вносимого тепла при различных температурах нагрева лома

Средняя температура, °С	100	200	300	400	500	600
Полезное вносимое тепло, кВт ч/т	13,0	26,6	47,9	57,3	74,3	94,7

### 1.2.1 Подогрев лома на специальных установках

Лом в загрузочных бадьях нагревают природным газом, мазутом или теплом отходящих из печи газов. Иногда бадьи с ломом нагревают теплом остывающих заготовок МНЛЗ. Результаты эксплуатации различных типов установок и сравнительные экономические расчеты показывают, что наиболее экономичен нагрев за счет печных (дымовых) газов. Дымовые газы уносят 15 – 25 % тепла от вводимой в печь энергии, и если на их пути – между камерой дожигания и газоочисткой – встроить комплекс оборудования для подогрева лома, то определенная часть этого тепла будет использована. В настоящее время все сооружаемые установки для подогрева лома ориентированы на использование печных газов.

При проектировании таких установок необходимо учитывать особенности нагрева печными газами.

Привозной стальной лом почти всегда загрязнен маслами, пластмассами и другим мусором, возгорающимся при высоких температурах с образованием большого количества дыма с неприятным, неуловимым современными газоочистками запахом. Для устранения этого эффекта в современных установках предусматривается рециркуляция газов – система, когда газы из камер подогрева лома вновь подаются в камеру дожигания, где пахучие компоненты дожигают совместно с печными газами.

Принципиальная схема двухкамерной установки с рециркуляцией газов приведена на рисунке 1.4. Выходящие из сводового патрубка 1 технологические газы с температурой до 1200 – 1600 °С через стационарный газоход 3 поступают в камеру дожигания 4. Зазор между сводовым патрубком и стационарным газоходом регулируется подвижной муфтой 2 с механическим приводом. Подсасываемый через зазор воздух охлаждает печные газы и окисляет содержащуюся в них окись углерода (до 5 – 6 % – на расплавлении, до 25 % – в окислительном периоде).

В современных установках подогрева величина зазора между сводовым



патрубком и стационарным газоходом автоматически регулируется в зависимости от содержания в печных газах СО так, чтобы количество подсасываемого воздуха – окислителя СО – обеспечивало избыток кислорода на уровне 1,1 – 1,2. Расходы печных газов и подсасываемого воздуха должны быть практически одинаковы. В этом случае температура газов после дожигания понижается до 773 – 873 К, что позволяет эффективно использовать их для подогрева лома.

На многих отечественных заводах стационарный газоход выполняется с прямоугольным раструбом при отношении высоты к ширине от 1 до 2,5, что необходимо для приема печных газов при технологических наклонах печи в пределах 2 – 5 градусов. Для перекрытия створа стационарного газохода на сводовом патрубке предусмотрены закрылки. Из-за коробления закрылков и большого сечения стационарного газохода зазор получается слишком большим и объем подсасываемого воздуха в 5 – 8 раз превышает объем печных газов. В результате температура газов после камеры дожигания не превышает 573 К, что уменьшает эффективность подогрева лома.

После камеры дожигания газы (60 – 70 % от общего расхода) отсасываются дымососом 8 в байпасный газоход 5 и, отдав тепло лому в камерах подогрева 6, вместе с возгонами нагнетаются вновь в камеру дожигания. Остальные 30 – 40 % газов, минуя рециркуляционное кольцо, поступают через котел-утилизатор на газоочистку и затем выбрасываются через дымовую трубу в атмосферу. Мощность дымососа 8 должна быть достаточна для преодоления аэродинамического сопротивления лома в загрузочной бадье и рециркуляционной линии газоходов. С увеличением объема рециркулирующего газа повышается доля тепла для подогрева лома, но, с другой стороны, увеличение объема рециркулирующих газов требует увеличение мощности дымососа, что ведет к повышению расхода электроэнергии.

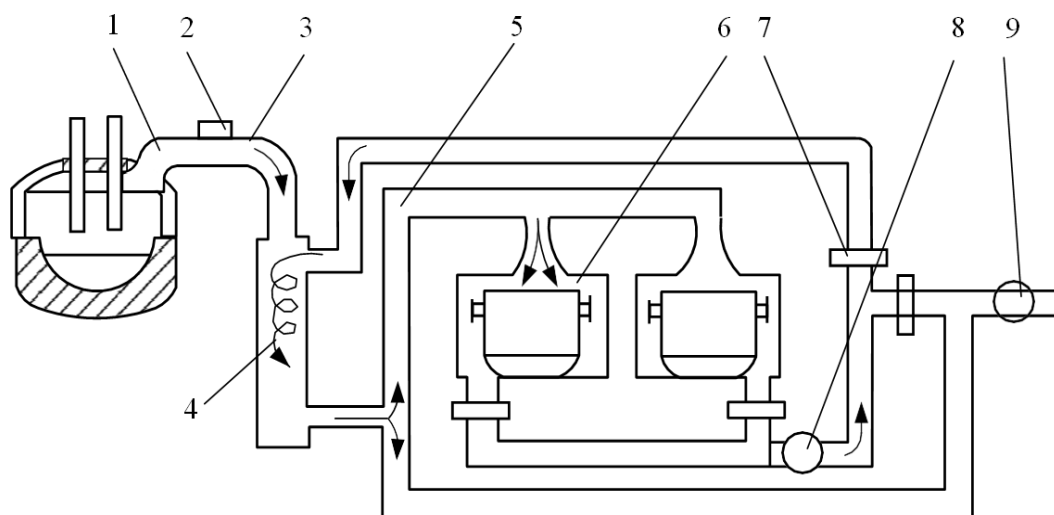


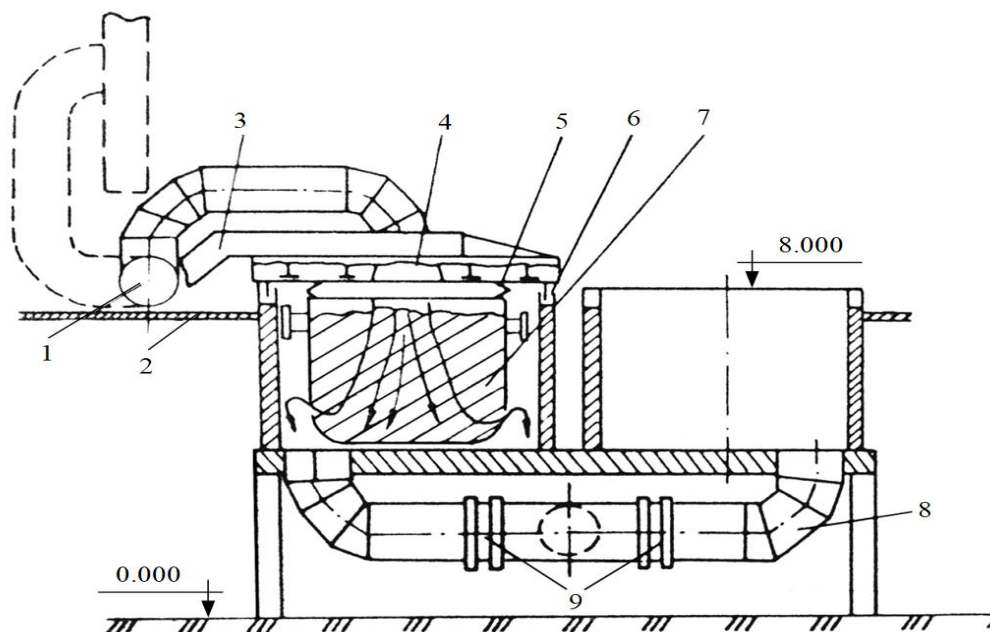
Рисунок 1.4 - Принципиальная схема двухкамерной установки с рециркуляцией газа

Система клапанов 7 позволяет направлять газовый поток в одну или обе камеры подогрева, а если лом чистый, то после камер – на газоочистку. В этом случае на нагрев лома используется весь газ, поступающий из камеры дожигания. При такой «прямой» системе нагрева температура газа на входе камер нагрева выше и лом нагревается лучше.

На рисунке 1.5 показан один из вариантов компоновки камер для подогрева лома. Здесь герметичная крышка камеры с газоходом горячих газов поднимается коромыслом с электроприводом. Широко распространены конструкции с подъемно-откатными крышками. Эффективная работа установки возможна, если горячие газы проходят через шихту в бадье, поэтому обязательной деталью установок является металлическое уплотнение между крышкой и верхним ободом бадьи 5.

Имеются клапаны для продувки камеры и бадьи воздухом. Зарубежный опыт показывает, что при нагреве лома до 673 К какие-либо переделки загрузочных бадей для повышения их механической прочности не требуются. При этом температура поступающих в камеры подогрева газов не должна превышать 973 К. Бадья должна иметь отверстия в челюстях для лучшего прохода дымовых газов. Через эти же отверстия из бадьи вытекают жидкие масла и другие

продукты, стекающие на дно при подогреве лома.



- 1 – рабочая площадка; 2 – шарнирное соединение газохода горячих газов; 3 – коромысло механизма подъема крышки; 4 – крышка камеры; 5 – металлическое гибкое уплотнение; 6 – песочный затвор; 7 – загрузочная бадья; 8 – газоход отработанных газов; 9 – клапан

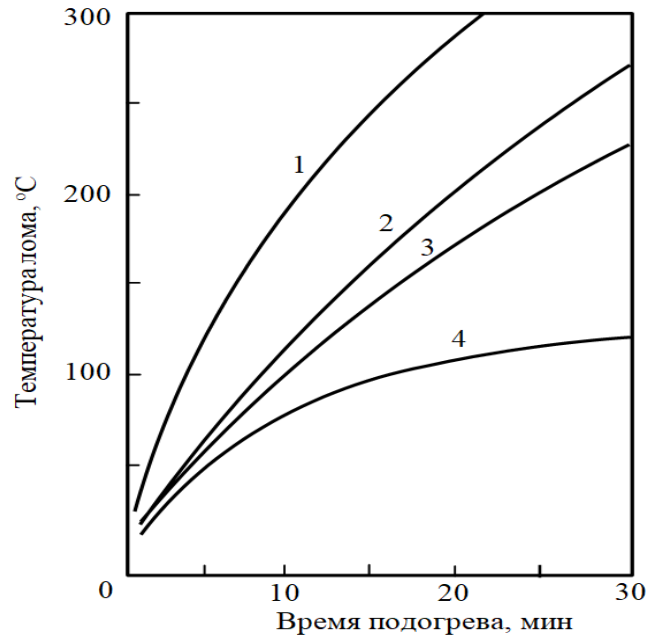
Рисунок 1.5 – Двухкамерная установка подогрева лома

Скорость нагрева лома зависит от многих факторов, в том числе от разности температур лома и омывающих его газов; от объема горячих газов: чем выше расход газов, тем полнее используется их теплота – при увеличении их расхода от 50 до 100 тыс. м<sup>3</sup>/ч тепловой КПД возрастает с 55 – 60 до 75 %. Но следует иметь в виду, что искусственное увеличение объема газов за счет разбавления воздухом понижает их температуру и уменьшает эффект от подогрева лома.

Скорость нагрева зависит и от удельной поверхности лома – чем она выше, тем быстрее нагрев. С этой точки зрения лучше подогревать лом с малой насыпной плотностью. Оценить температуру лома в зависимости от продолжительности нагрева можно с помощью диаграммы на рисунке 6.

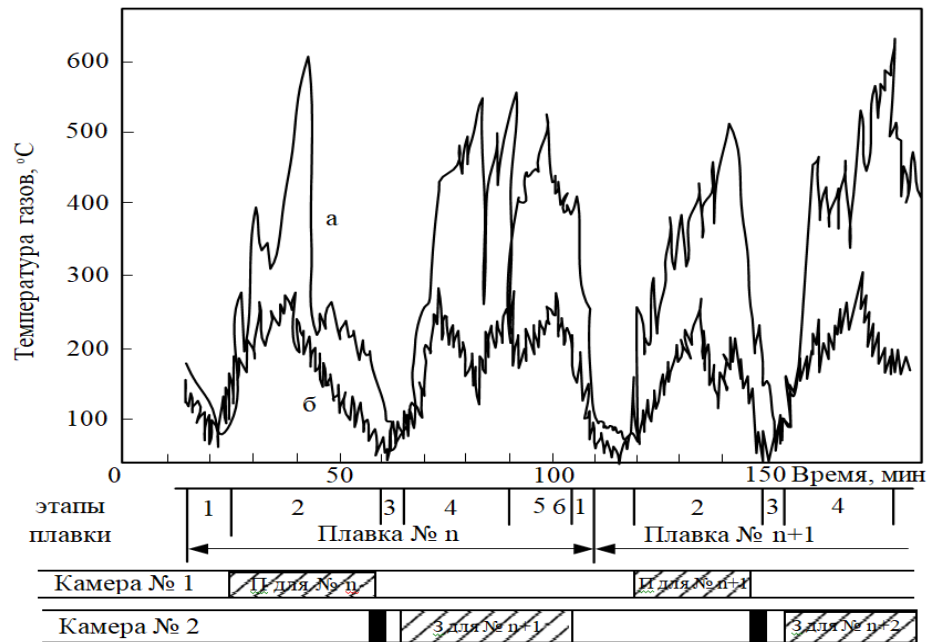
Объем и температура выделяющихся из печи газов и, следовательно, газов, поступающих в камеры подогрева, по ходу плавки непостоянны. Представление о характере изменения температуры газов на входе и выходе камер подогрева

100-т печи, работающей одношлаковым процессом с загрузкой шихты в два приема, дает рисунок 1.6.



1 – стружка; 2 – подготовленный лом; 3 – тяжеловесный лом; 4 – пакетированный лом

Рисунок 1.6 – Продолжительность подгрева различных типов лома



1 – заправка и завалка; 2 – расплавление завалки; 3 – подвалка;  
 4 – расплавление подвалки; 5 – окислительный период; 6 – выпуск

Рисунок 1.7 – Изменение температуры газов на входе (а) и на выходе (б) из камеры подгрева

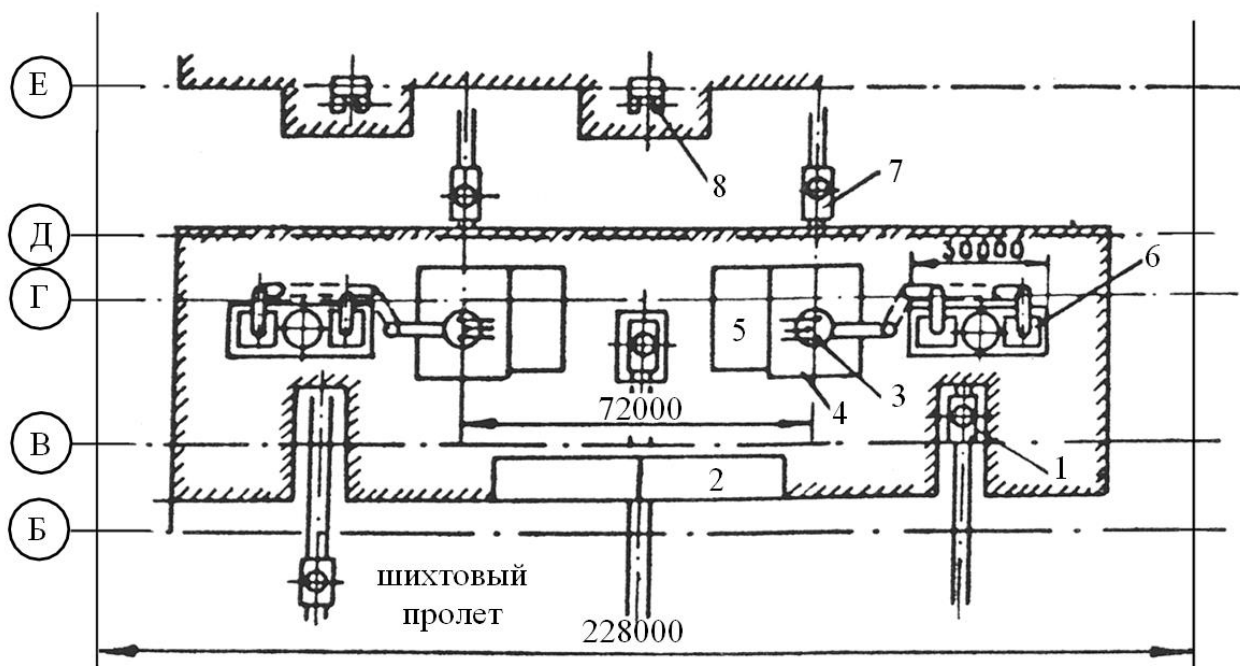
Как видно из рисунка 1.7, наиболее благоприятны для нагрева лома расплавление подвалки (2-я бадья) и окислительный период – этапы, когда выгорает углерод с образованием большого количества высоконагретых газов. Менее благоприятно время расплавления основной порции завалки (1-я бадья). При заправке печи, загрузке шихты и во время выпуска нагревать лом нечем. С учетом этих особенностей и организуется работа по подогреву лома. На том же рисунке 6 приведен график согласования работы печи и двух камер. Одна из камер используется для подогрева подвалки на «собственную» плавку во время расплавления основной порции завалки (1-я бадья); вторая камера используется для нагрева лома основной завалки следующей плавки. При загрузке бадьи в два приема достаточно одной камеры, но это потребует очень жесткой организации работы шихтового и печного пролетов.

Если шихта загружается в три приема (1-я бадья – основная завалка, 2-я и 3-я бадьи – подвалки), то организовать подогрев всей шихты сложно. На некоторых заводах ограничиваются подогревом лома в первой и третьей бадьях. Возможен и другой вариант: подогреваются все бадьи, но вторая бадья устанавливается в камеру на очень короткое время. Оптимальный график работы выбирается из конкретных условий.

Основное требование, учитываемое при проектировании цехов с установками для предварительного подогрева лома, – установка должна размещаться на минимальном расстоянии от электропечи. Это позволяет уменьшить тепловые потери при подаче нагретой бадьи; уменьшить длину газоходов и потери тепла дымовых газов и уменьшить подсос воздуха. Установка должна располагаться так, чтобы при многократных перестановках загрузочных бадей пробег мостовых кранов был минимальным. Один из возможных вариантов размещения двухкамерных установок предварительного подогрева в электросталеплавильном цехе с двумя 100-тонными печами показан на рисунке 5. В представленном варианте камеры подогрева расположены выше уровня пола цеха, обслуживаются с площадки печного пролета. Известны многочисленные варианты размещения камер на уровне пола цеха как в печном, так и в других

пролетах.

Организация работы в цехах, оборудованных установками подогрева лома, имеет некоторые особенности: во-первых, поступление бадей из шихтового пролета (отделения) должно опережать потребность печи в шихте на время, необходимое для подогрева лома и перемещения в печном пролете бадей с холодным и нагретом ломом. Во-вторых, из-за увеличения времени прохождения бадей в печном пролете увеличивается их парк. Расчет задолженности загрузочных бадей усложняется тем обстоятельством, что движение их в печном пролете должно жестко увязываться с работой печи и камерами подогрева. Решение задачи значительно облегчается, если использовать циклограммы согласованного движения бадей (рис 8). Здесь представлена циклограмма для случая двухстадийной загрузки шихты в печь, режим работы которой изображен на рисунке 1.8.



- 1 – скраповоз; 2 – пульт управления; 3 – дуговая печь;  
4 – шумозащитный кожух; 5 – печная подстанция; 6 – установка подогрева; 7 –  
сталевоз; 8 – МНЛЗ

Рисунок 1.8 – Вариант размещения двухкамерных установок предварительного подогрева лома в цехе с двумя 100-т печами

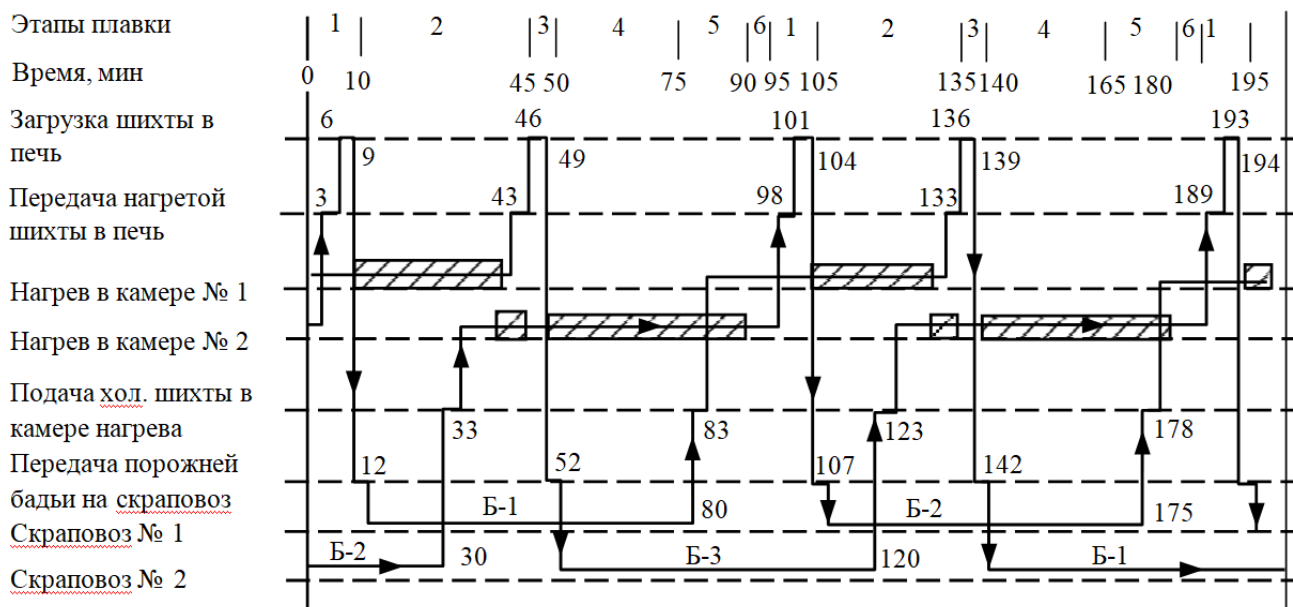
При построении циклограммы приняты следующие продолжительности крановых операций:

- передача бадьи с нагретым ломом от установки подогрева к печи – 3 мин.
- загрузка шихты в печь – 3 мин.
- переезд и установка порожней бадьи на скраповоз – 3 мин.
- захват бадьи с ломом на скраповозе и подача ее к установке подогрева – 3 мин.
- установка бадьи в камеру для подогрева – 3 мин.

Продолжительность подъема электродов и отворота свода в сумме принята равной 1 мин, такой же принята продолжительность обратных операций.

Из циклограммы (рис. 1.9) следует, что если шихта подается в печной пролет скраповозом, то для обеспечения подогретым ломом одной печи требуется два скраповоза и три бадьи: две бадьи на скраповозах, одна – в камере подогрева. В целом следует отметить: при приемлемо жестком режиме работы бадей в печном пролете полезно используемое время в шихтовом отделении (при загрузке шихты) составляет всего около 50 % от времени пребывания бадей здесь.

При проектировании обычно исходят из приоритетности работы печи по отношению к предварительному подогреву лома: завалку или подвалку проводят по графику безостановочной работы печи, независимо от того, подогрет или не подогрет лом. Поэтому при работе с двумя подвалками одна из подвалок загружается холодной [5].



- 1 – заправка и завалка; 2 – расплавление завалки; 3 – подвалка;  
 4 – расплавление подвалки; 5 – окислительный период; 6 – выпуск

Рисунок 1.9– Циклограмма движения загрузочных бадей в печном пролете

### 1.2.2 Подогреватель лома системы VERTICON

Фирма SMS (Германия) разработала конструкцию подогревателя VERTICON, использующего теплоту технологического газа дуговых сталеплавильных печей для нагрева лома перед его загрузкой в печь (рисунок 1.10). Верхняя часть подогревателя соединена с патрубком газоотвода печи. Технологический газ, проходя сверху вниз через три камеры подогревателя, заполненные ломом, отдает ему теплоту. В верхней камере сгорают горючие материалы, имеющиеся в металлошихте. Каждая камера содержит около одной трети загрузки печи. В периоды загрузки нагретого лома, из нижней камеры в печь через загрузочное окно на остаток расплава от предыдущей плавки, когда печь отключена от электропитания, подогрев лома осуществляется с помощью горелок. Плавку проводят под вспененным шлаком, что обеспечивается путем вдува в него кислорода и угля с помощью стеновой фурмы. Лом нагревается до температуры 800 °С. Печь вместимостью 120 т оборудована подогревателем лома вместимостью 200 т



и производительностью 200 т/час. В таблице 1.2 приведены основные характеристики работы ДСП в паре с подогревателем системы VERTICON.

Таблица 1.2 – Показатели работы установки VERTICON

Показатель	Значение
Количество нагревов в сутки	40
Время нагрева, мин	36
Загрузка подогретого лома, т	130
Болото жидкого металла в печи, т	40
Мощность трансформатора, МВ- А	65
Время плавления, мин	24
Время нагрева жидкого металла, мин	4
Время печи под током, мин	28
Общая длительность плавки, мин	36
Расход электроэнергии, кВт·ч/т	245
Расход электродов, кг/т	1-1,5
Расход углерода, кг/т	10-15
Расход извести, кг/т	30
Расход кислорода, нм <sup>3</sup> /т	30-40
Расход природного газа, нм <sup>3</sup> /т	10

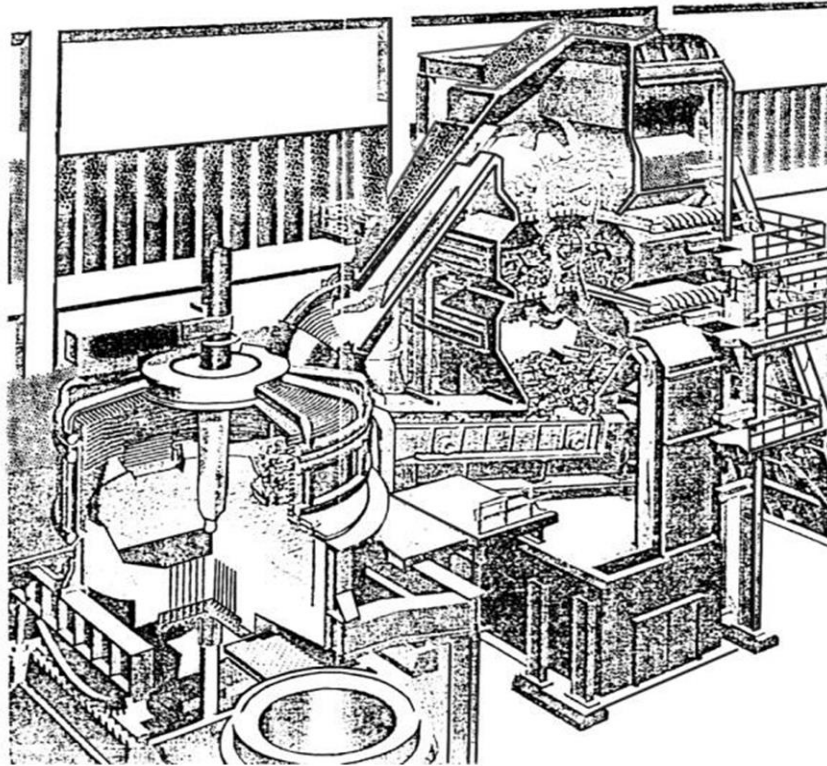


Рисунок 1.10 – ДСП с подогревателем лома системы VERTICON

На рисунках 1.11 и 1.12 приведены график нагрева лома в установке системы VERTICON и тепловой баланс процесса плавки.

При использовании подогревателя лома системы VERTICON повышается выход годного металла, устраняются поломки электродов, процесс плавления протекает спокойно. Так как загрузка лома проводится без отворота свода, расход электроэнергии снижается на 20 – 40 кВт ч/т. При этом продолжительность плавки в 120-т печи снижается до 36 мин, что обеспечивает производительность печи 200 т/ч [6].

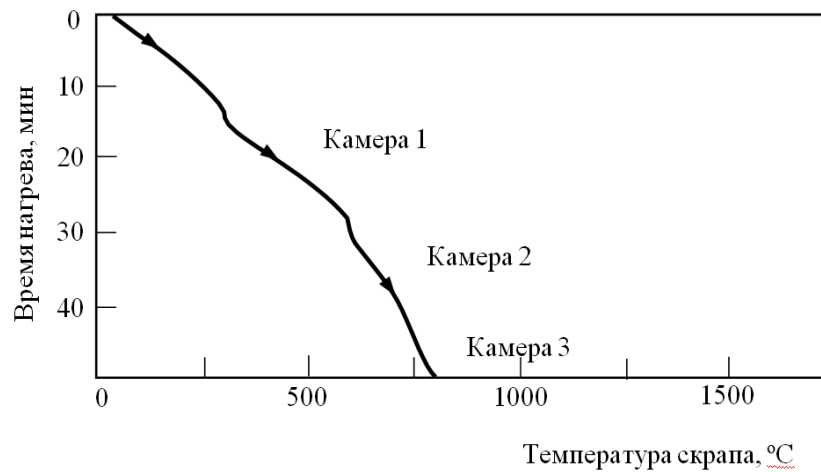


Рисунок 1.11 – График нагрева лома в установке VERTICON

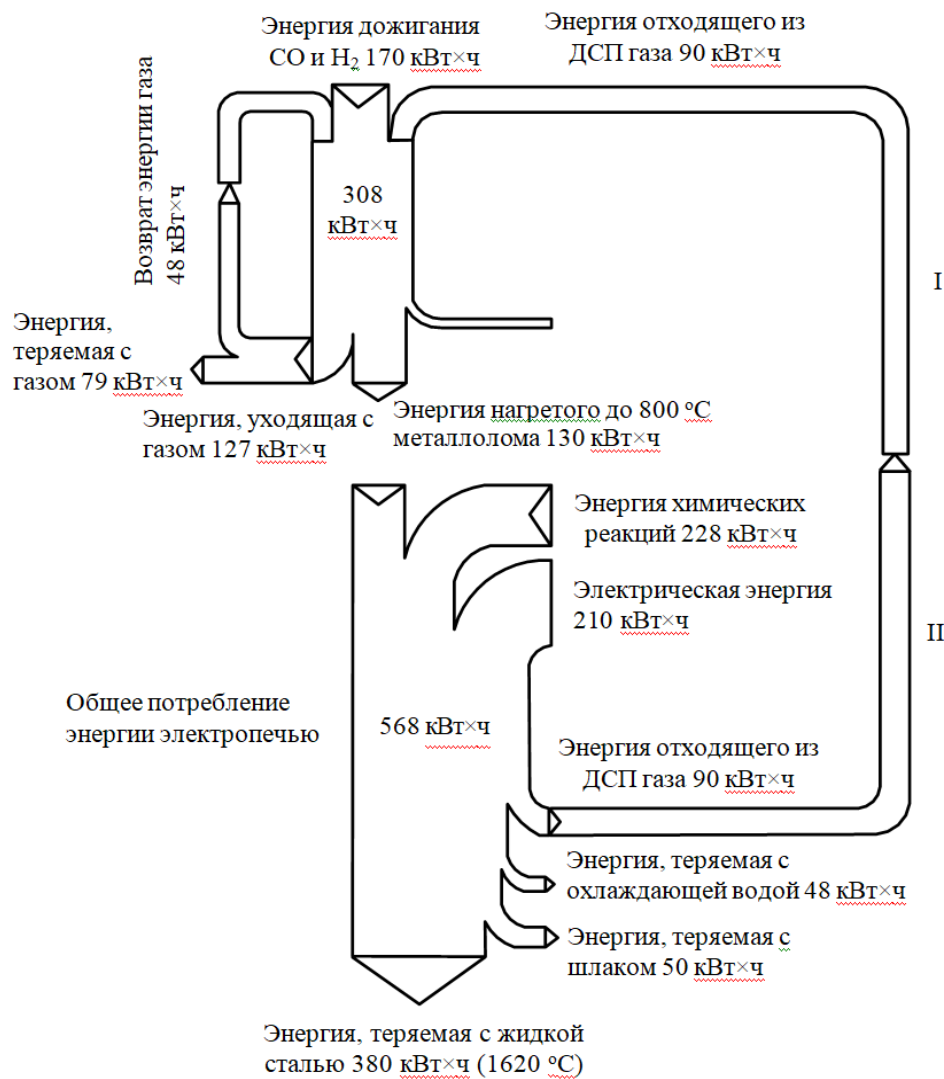


Рисунок 1.12 – График нагрева лома в установке VERTICON

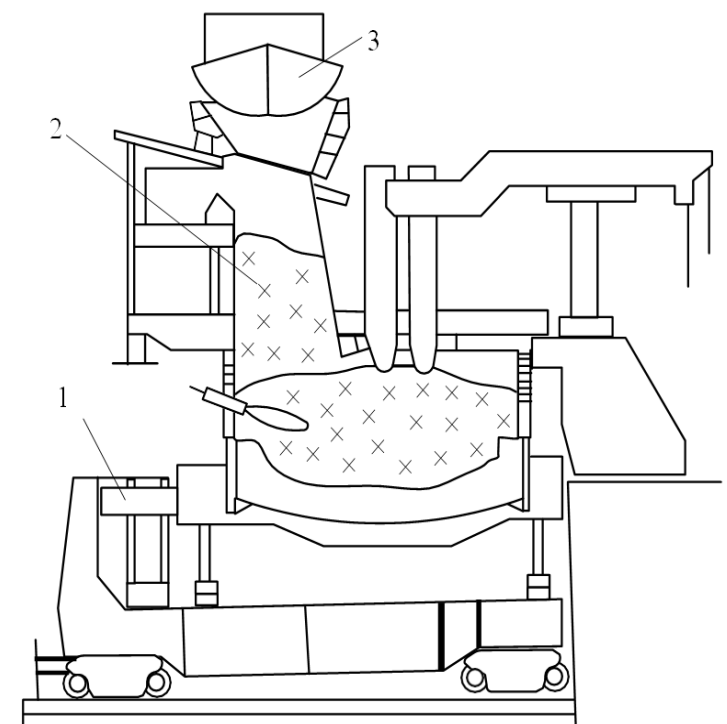
### 1.2.3 ДСП с простым шахтным подогревателем

Большой интерес вызвал разработанный Фукс Систем Инкорпорейшн подогреватель лома шахтного типа, располагаемый над дуговой печью и позволяющий дополнительно увеличить степень утилизации тепла отходящих газов, что позволяет сэкономить электроэнергию на 20 %.

Конструктивно существует три разновидности печей с шахтным подогревом лома:

- ДСП с простым шахтным подогревателем;
- двухкорпусные ДСП с простым шахтным подогревателем;
- ДСП с шахтным подогревателем с удерживающими пальцами.

ДСП с простым шахтным подогревателем (рисунок 1.13) представляет собой современную дуговую сталеплавильную печь, на которой сверху на свод вместо газоотводящего патрубка установлена металлическая шахта.



1 – дуговая сталеплавильная печь ; 2 – шахтный подогреватель лома; 3 –  
грейфер крана

Рисунок 1.13 – ДСП с шахтным подогревателем лома

После выпуска предыдущей плавки на оставшееся болото металла через шахту загружается металлолом в полном объеме, необходимом для одной плавки.

После включения электродов, образующиеся газы поднимаются по шахтному подогревателю, отдавая тепло находящейся в ней шихте и предварительно ее подогревая. По мере проплавления металлошихта постепенно опускается в ванну печи, расплавляясь за счет тепла металла, шлака и электрических дуг. Печь вместимостью 90 т имеет диаметр кожуха 6,1 м, шахту объемом 67 м<sup>3</sup>, графитированные электроды диаметром 560 мм и работает при максимальном напряжении 820 В [7].

#### **1.2.4 Двухкорпусная печь с шахтным подогревом**

Идея создания двухкорпусных печей с шахтным подогревом взята из реализованных проектов успешно работающих двухкорпусных сверхмощных ДСП. Двухкорпусные шахтные печи позволяют реализовывать непрерывное использование тепла отходящих газов во все периоды плавки. Двухкорпусный агрегат имеет одну систему трансформатор – электрододержатель – электроды, которая обслуживает работу двух сталеплавильных ванн. Когда в первой ванне идет плавление и рафинировка с использованием дугового нагрева в соседней ванне ведется подогрев металлолома в шахте за счет топливно-кислородных горелок и отходящих газов из первой печи. Поэтому плавка во второй ванне начинается уже на горячей шихте, что значительно стабилизирует процесс горения дуг и позволяет использовать вводимую мощность на 92 %.

При сравнении однокорпусных и двухкорпусных шахтных печей (таблица 1.3) было установлено, что двухкорпусные печи обеспечивают уменьшение длительности цикла плавки на 20 – 35 %, повышение производительности на 20 – 30 %, снижение расхода электродов на 15 – 20 % в связи с уменьшением работы печи под током и единой электрической системой [8].

Таблица 1.3 – Сравнительные показатели работы одно- (ОШ) и двухкорпусных (ДШ) ДСП вместимостью 90 т с шахтным подогревателем лома

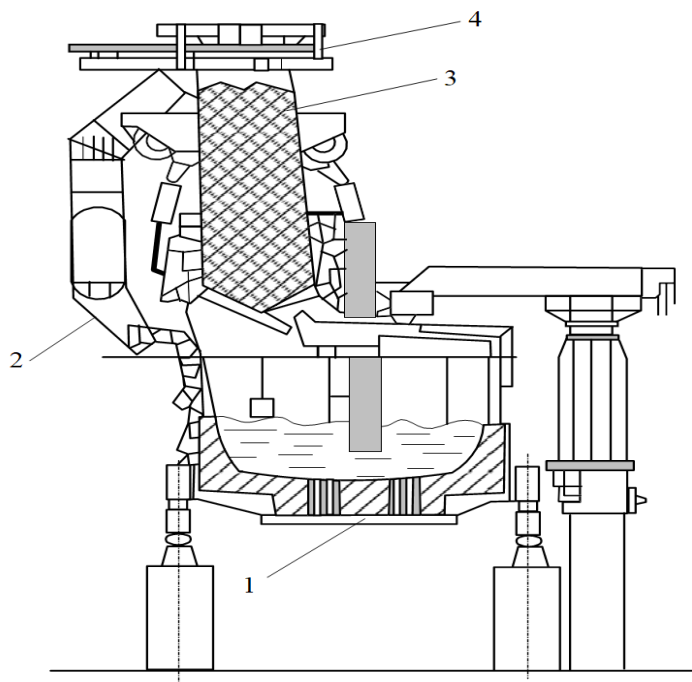
Показатели	ОШ	ДШ
Расход электроэнергии, кВт-ч/т	330	340-360
Расход электродов, кг/т	1,8	1,6
Расход кислорода, нм <sup>3</sup> /т	30	25-30
Расход газа, нм <sup>3</sup> /т	7	6-8
Углерод завалки, кг/т	15	8-10
Углерод дутья, кг/т		3-8
Время под током, мин	33-40	35-37
Общая длительность цикла плавки, мин	51-60	38-43
Производительность, т/ч	96-112	130-153
Годовая производительность, т/год	700-800	1030-1100

Использование комплекса из двух ДСП с шахтным подогревателем с единой системой электропитания печей влечет за собой повышенные капитальные вложения на исходном этапе. Однако они будут окуплены в течение более короткого времени по сравнению со строительством двух однокорпусных печей. Во Франции, Люксембурге, Бельгии и США введены в строй двухкорпусные печи вместимостью 90, 95, 140 и 165 т [9].

### 1.2.5 Шахтные печи с удерживающими пальцами

Дальнейшее развитие идея шахтного подогрева получила в создании ДСП с шахтным подогревом с удерживающими пальцами (рисунок 1.14). Идея заключается в том, что шахта постоянно заполнена металлоломом, который опускается по мере необходимости загрузки печи. Таким образом, используется тепло отходящих из ДСП газов на всех режимах работы ДСП. Постепенная завалка печи с подвалкой обеспечивает быстрое плавление скрапа. Цикл плавки заключается в завалке первой загрузки сразу после подготовки печи и ее расплавление в ДСП. Одновременно шахта заполняется металлоломом, который подогревается отходящими газами. После проплавления второй завалки, шахта вновь заполняется скрапом, который

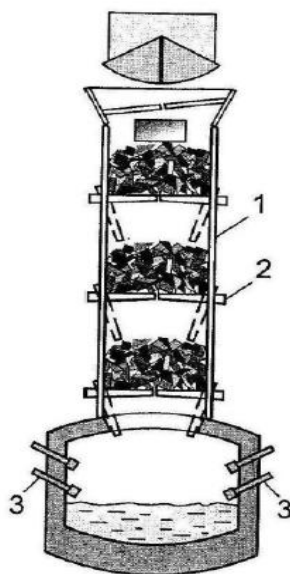
подогревается отходящими газами во время рафинировки и подогрева стали в ДСП (рисунок 1.15).



1 – ДСП; 2 – удерживающие пальцы;

3 – приемная воронка; 4 – заслонка шихты

Рисунок 1.14 – Схема ДСП с шахтным подогревателем с удерживающими пальцами



1 – шахта, 2 – удерживающие пальцы, 3 - ТКГ

Рисунок 1.15 – Секционированный подогреватель шихты на шахтной печи

ДСП с шахтным подогревателем лома с удерживающими пальцами представляет собой сверхмощную ДСП, в которой на месте патрубка отвода газа устанавливается металлическая шахта, соединенная с системой отвода газа на газоочистку. На уровне свода печи устанавливаются удерживающие пальцы, которые регулируют поступление металлолома в ДСП. Удерживающие пальцы изготавливаются в виде полых коробок из коррозионностойкой жаростойкой стали и охлаждаются водой.

Показатели работы 150-т обычной дуговой печи (ДСП), шахтной дуговой печи (ШП) и шахтной дуговой печи с удерживающими пальцами, оборудованной системой донного выпуска, приведены в таблице 1.4 Энергетический баланс обычной ДСП и оборудованной шахтным подогревателем лома приведены на рисунке 16.

Таблица 1.4 – Показатели работы 150-т обычной печи (ДСП), шахтной дуговой печи (ШП) и шахтной дуговой печи с удерживающими пальцами, оборудованной системой FAST (ШПФ)

Показатели работы	ДСП	ШП	ШПФ
Температура стали при выпуске, °С	1620	1620	1600
Токовое время плавки, мин	38	26,5	25,8
Бестоковое время плавки, мин	12	11	8,0
Продолжительность плавки, мин	50	37	33,5
Производительность печи, т/ч	180,5	239,8	267,9
Количество плавков в сутки	28,8	38,4	42,9
Выделение CO <sub>2</sub> , кг/т	667	440	430
Издержки, долл./т	18,79	14,05	11,52
Расход электроэнергии, кВт ч/т	384	270	264
Расход электродов, кг/т	1,6	1,1	1,0
Расход кислорода, нм <sup>3</sup> /т:			
– фурмы	30	28	28
– горелки	5,4	9,8	9,6
Расход газа (горелки), нм <sup>3</sup> /т	2,4	4,4	4,4
Расход угля в завалку, кг/т	12	12	12
Расход инжестируемого угля, кг/т	7,3	4,1	3,8
Расход извести, кг/т	42	42	42

Как видно из рисунка 1.16 затраты электроэнергии в чистом виде при



использовании шахтного подогрева снижаются с 400 до 300 кВт ч/т стали, т. е. с 60 до 51 %. Необходимо при этом учесть и энергетические затраты топливно-кислородными горелками. Суммарные затраты снижаются с 68 до 63 % (51+12). При этом общее использование вносимой энергии возрастает с 57 до 67 %, благодаря тому, что около 100 кВт ч/т возвращается в виде тепла, переданного металлолому отходящими газами в шахтном подогревателе. Сравнительный технологический и энергетический анализ показывают, что применение ДСП с шахтным подогревателем лома позволяет повысить производительность плавильного агрегата на 25 – 30 %, снизить энергетические затраты, включая электроэнергию и топливно-кислородные горелки, на 20 –25 %, повысить общее использование энергоресурсов на 10 %. При этом энергия отходящих газов используется на 60 %.

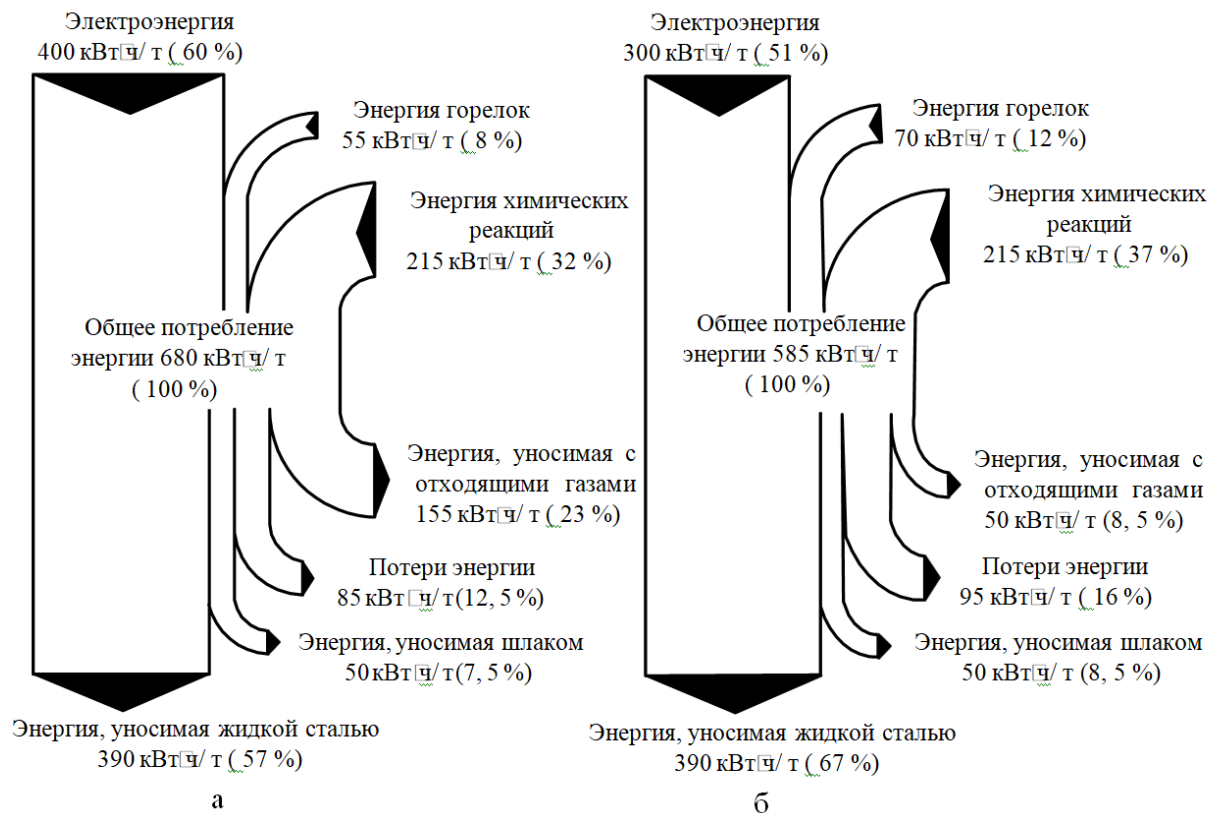


Рисунок 1.16 – Сравнительный энергетический баланс выплавки стали в обычной ДСП (а) и оборудованной шахтным подогревателем лома (б)

Однако шахтные печи сложны в эксплуатации и имеют ряд специфических особенностей: большие габаритные размеры, возможна свариваемость отдельных кусков шихты в процессе подогрева, большая высота падения шихты при завалке

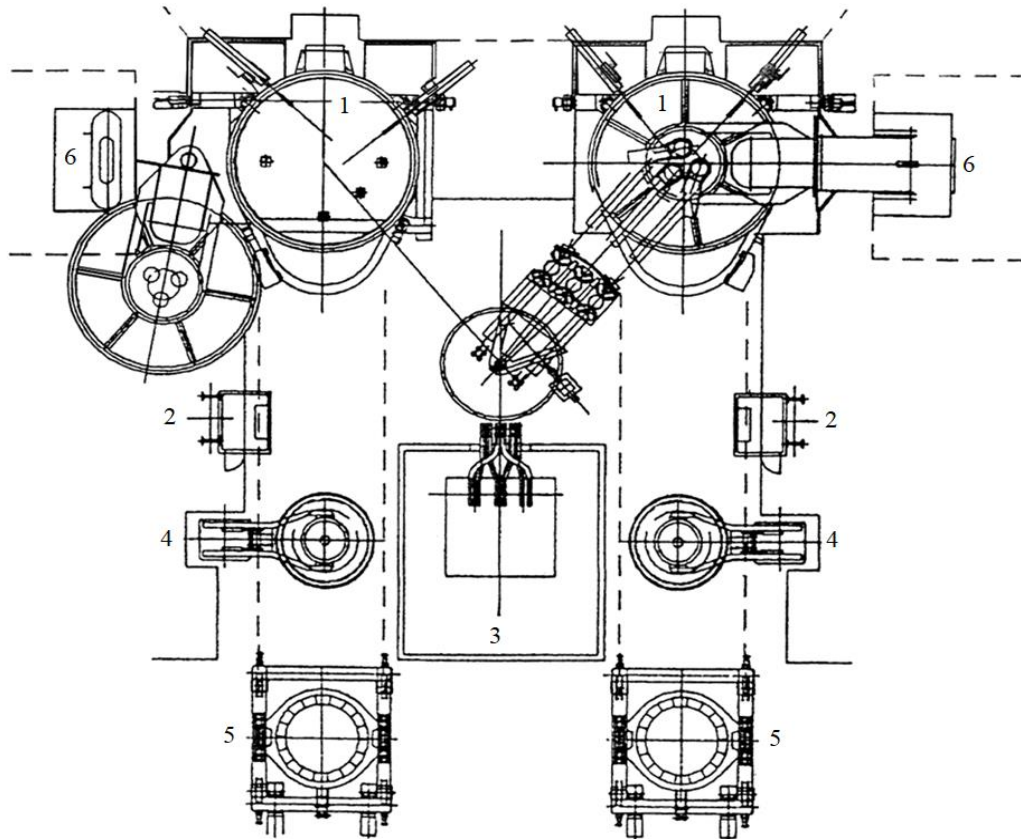
подогретого лома на подину, наличие водоохлаждаемых пальцев в шахте, значительно большие инвестиции по сравнению с обычными печами. Поэтому при выборе конструкции печи необходимо руководствоваться экономическими и технологическими задачами проекта реконструкции или строительства новых печей.

### **1.2.6 Двухкорпусная ДСП**

Двухкорпусная ДСП представляет собой плавильный агрегат, состоящий из двух корпусов. В одном производят нагрев лома с помощью горелок, в другом расплавляют нагретый лом электрическими дугами (рисунок 1.17). Одновременно на специальном стенде производят предварительный нагрев лома в загрузочной корзине за счет тепла газов, отходящих от обеих печей. После выпуска плавки из второй печи, в нее загружают из корзины предварительно нагретый лом и продолжают его дополнительный нагрев с помощью горелок. В первой печи начинают расплавление лома электрическими дугами.

Как только температура стали и ее химический состав достигают заданных значений, начинается выпуск металла, а электрод передвигается на другой корпус, где происходит расплавление шихты. Во время процесса плавки во втором корпусе в первом после выпуска стали очищается выпускное отверстие, затем оно заполняется магнезитовым порошком (эркерный выпуск), осуществляется загрузка лома.

При таком методе выплавки стали время простоя уменьшается до минимума (менее 15 % от всего времени плавки), а производительность печи вместимостью около 100 т увеличивается до 140 т/ч. Сталь выпускают в ковши, установленные на двух отдельных стелевозных тележках [10].



1 – корпус ванны ДСП (А, Б); 2 – пульт управления выпуском стали; 3 – трансформатор; 4 – подогреватель сталеразливочного ковша; 5 – сталевоz; 6 – система газоотвода с предварительными подогревом

Рисунок 1.17 – Схема расположения двухкорпусной ДСП

### 1.2.7 Технология Consteel

Система Consteel явилась эффективным ответом на возросшие требования, с которыми столкнулись металлурги во всем мире. Эффективное использование доступных видов энергии, удовлетворение жестких требований нормативной документации, связанной с охраной окружающей среды, повышение производительности – таковы некоторые особенности этой промышленной технологии. Для процесса Consteel характерна постоянная загрузка в электродуговую печь (ЭДП) металлосодержащей шихты (тяжеловесного и легковесного лома, чушкового и жидкого чугуна, горяче-брикетированного железа и др.), которая предварительно нагревается, и контролируемый выброс газов. В

технологической линии Consteel скрап с помощью кранов загружают на горизонтальные импульсные транспортеры, которые его подают в ванну ЭДП (рис. 1.18).

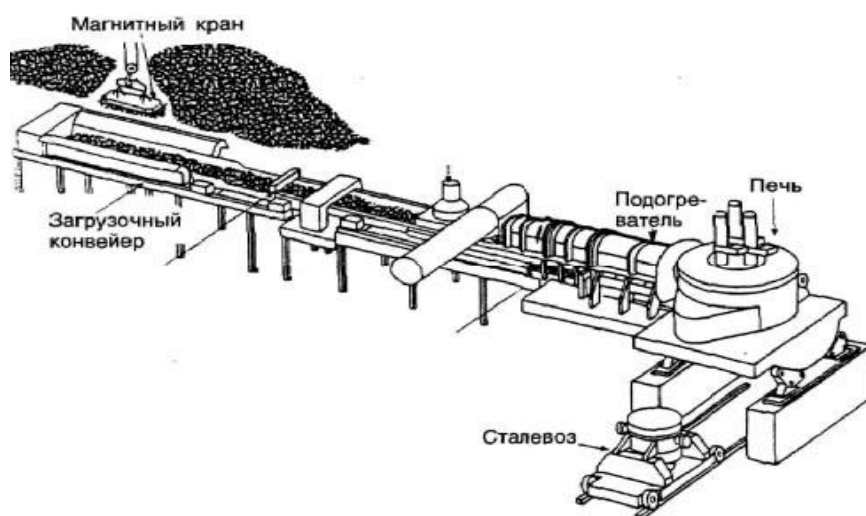


Рисунок 1.18 – Схема системы Consteel

Перед поступлением в печь скрап проходит через участок предварительного подогрева с туннельной печью, где нагревается потоком отходящих газов, движущихся во встречном направлении. В ходе непрерывной загрузки ванна с жидким металлом в ЭДП защищена слоем вспененного шлака, и ее температура – или удельный расход энергии – контролируется. Скрап, поступающий в печь, погружается в жидкий металл (оставшийся от предыдущей плавки), который всегда имеет достаточный объем. Электрическая дуга горит под слоем вспененного шлака (рис. 1.19) [11].

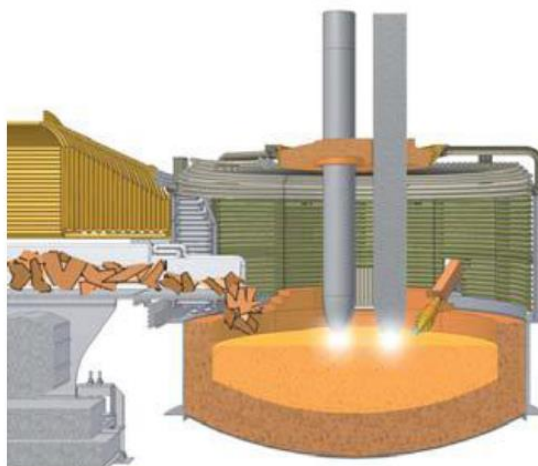


Рисунок 1.19 – Загрузка и расплавление предварительно нагретого лома

Энергия передается ванне с жидким металлом и шлаку с большей эффективностью, при этом уменьшается излучение в направлении стеновых панелей и огнеупоров. Металлическая ванна большую часть работы под током покрыта вспененным шлаком и благодаря этому электрическая дуга горит в стабильном режиме, по сравнению с горением электрической дуги в атмосфере печи. Основным преимуществом процесса Consteel является экономия электроэнергии, достигаемая благодаря действию следующих факторов:

- предварительному нагреву скрапа;
- отсутствию необходимости открывать крышку печи для загрузки скрапа;
- высокому соотношению времени работы печи под током и длительности плавки
- от выпуска до выпуска;
- влиянию консистентного вспененного шлака.

Предварительный подогрев скрапа важен с точки зрения экономии электроэнергии, но за последние 20 лет промышленного применения процесса Consteel с непрерывной загрузкой он продемонстрировал и такие преимущества, как безопасность, сокращение производственных расходов, снижение нагрузки на окружающую среду, комфортные и эргономичные условия работы персонала. Для смежных подразделений предприятия процесс Consteel создает меньше шума и запыленности [12].

В процессе Consteel не предъявляются особых требований к металлосодержащей шихте. Потребитель может приобретать скрап низкой плотности, так как отсутствуют ограничения по объему, присущие загрузке коробами. Другим важным и подтвержденным преимуществом является повышенный выход годного, достигаемый в результате более эффективного равновесия металлургических реакций в расплавленном металле благодаря снижению образований FeO. В результате значительно уменьшается стоимость металлошихты. Непрерывная загрузка обеспечивает высокую гибкость процесса, позволяя использовать железо прямого восстановления, горячебрикетированное железо, жидкий и чушковый чугуны [13].

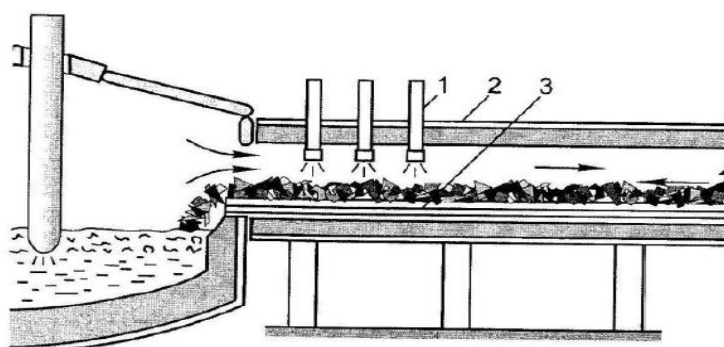
Равномерный процесс плавки в ванне печи оказывает меньшее воздействие на такое оборудование, как водоохлаждаемые стеновые панели, крышка, водоохлаждаемые фурмы, а также завалочные краны, которые уже не используются, за исключением редких случаев завалки коробами, например в начале кампании печи (рисунок 1.20). Кроме того, сокращаются объемы ремонтов футеровки и горелок. Новейшие системы Consteel спроектированы с высокой надежностью, высоким уровнем работоспособности (более 99 %), требуют небольшого и несложного ремонтного обслуживания [14].

Таблица 1.5. Техничко-экономические показатели печи Consteel ДСП - 300 на заводе«GJ Steel» (Таиланд)

Основные параметры	Значение
<b>Параметры печи</b>	
Масса плавки, т	187
Общая ёмкость ДСП, т	300
Фактическая масса жидкого остатка, т	95-100
Диаметр печи, мм	8500
Диаметр электродов, мм	610
Длина завалочного транспортера, м	75
Длина транспортера печи предварительного нагрева, м	40
Ширина транспортера, мм	2200
<b>Состав шихты</b>	
Чушковой чугуна, %	35-40
Пакетированный легковесный лом, %	30
Тяжеловесный лом, %	20-25
Горячебрикетированное железо, %	10
<b>Производственные показатели</b>	
Время работы печи под током, мин	50

Продолжение таблицы 1.5

Основные параметры	Значение
Время работы с отключенным током, мин	15
Производительность, тгс*/ч	173
Расход электроэнергии, кВтч/тгс*	363
Расход кислорода, м <sup>3</sup> /тгс (при н. у.)*	36
Расход природного газа	0
Расход вдуваемого углерода, кг/тгс*	14
Температура разливки, °С	1630
*Тонн годных слябов	



1 – топливно – кислородные горелки, 2 – корпус конвейера, 3 - шихта

Рисунок 1.20 – Схема конвейерной загрузки лома Consteel

На заводе «GJ Steel» выплавляют углеродистую низколегированную сталь в 187-тонной печи. Общая емкость печи равна 300 т, т. е. печь работает с остатком жидкой стали массой примерно 100 т, что составляет около 53,5 % массы разливаемой плавки. Скрап подается транспортером шириной 2 200 мм, имеющим общую длину примерно 115 м. Оперативная практика загрузки шихты имеет следующие особенности:

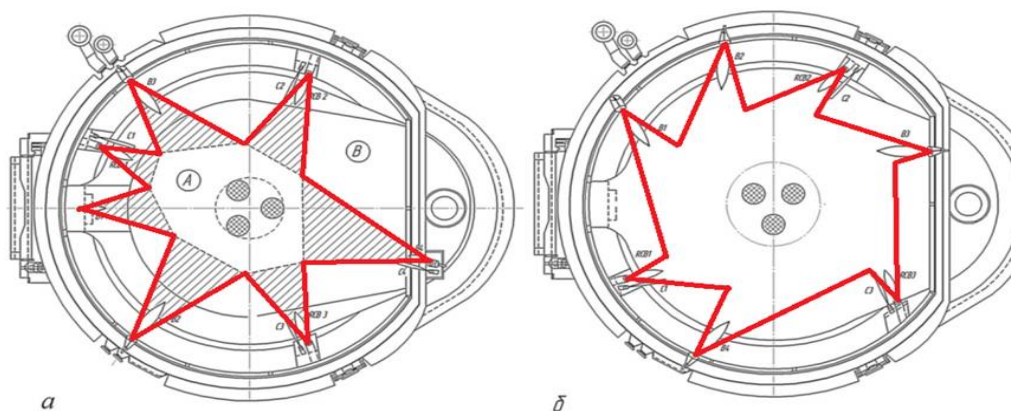
- верхним слоем загружают чушковый чугун, чтобы обеспечить максимальную эффективность предварительного нагрева;

- тяжеловесный лом загружают на транспортер нижним слоем, чтобы не замедлять скорость транспортера;
- средняя скорость подачи скрапа 4,5–5,5 м/мин, что примерно соответствует частоте вибрации 49 Гц [15].

### 1.3 Применение топливно-кислородных горелок

Использование различных видов «альтернативной» энергии в современных сверхмощных печах неравноценно при учете величины эксплуатационных затрат, влияния на себестоимость выплавляемого металла. Экономичность данного технологического решения определяется единицами усвоенной жидкой сталью тепловой энергии в кВт – ч / кг или м<sup>3</sup> расходуемого топлива.

Наименьшей стоимостью 1 кВт - ч тепловой энергии, переданной металлу и шлаку, является сжигание природного газа в газокислородных горелках. Энергии синтезируемая газокислородными горелками имеет наименьшую стоимость по сравнению со стоимостью электроэнергии (рис. 1.21).



RCB1...RCB3 – комбинированные горелочные фурмы; B1...B4 – стеновые газокислородные горелки; C1...C4 – фурмы для подачи углеродсодержащих материалов. а – базовое предложение фирмы Danieli; б – эффективное расположение

Рисунок 1.21 – Схема расположения ТСУ

Проблема застойных зон при расплавлении лома ярко выражена, и она



губительно сказывается на периоде расплавления лома во временном отрезке, так как непосредственный теплообмен через толщу твердого металла ограничен структурой лома.

Проблема застойных зон решается с вводом в эксплуатацию регулируемых по высоте и направлению топливно – кислородных горелок с регулируемой длиной факела.

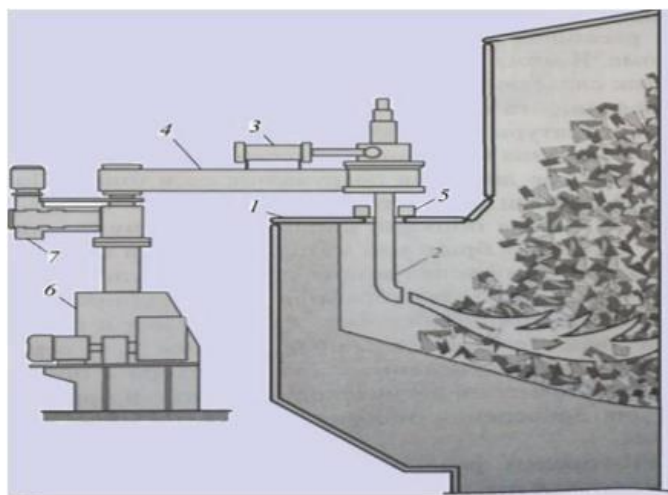
Решить этот вопрос можно на примере использования высокомошных поворотных горелок High Power Rotary (HPR - горелки). Главная особенность состоит в том, что по ходу плавки факелы HPR - горелок могут перемещаться от уже нагретых к относительно холодным зонам лома.

Это качество значительно расширяет действия факелов и позволяет увеличить полезную мощность горелок в несколько раз.

Факелы HPR - горелок по сравнению с конвенциональными горелками отличаются также более низкой температурой и в несколько раз большей кинетической энергией. Что позволяет им внедряться в массу загруженного лома на большую глубину вплоть до самой подины. При этом греющие газы проходят в слое лома максимальное расстояние, что значительно увеличивает теплоотдачу и коэффициент полезного действия топлива.

### **1.3.1 Эркерные и стеновые HPR-горелки**

Эркерная горелка работает следующим образом. Когда лом частично либо полностью загружен горелка опускается через эркерное отверстие служащее для забивки леточного отверстия, и подается смесь пропана либо мазута и кислорода. Благодаря тому, что лом попадает в камеру эркера лишь в незначительном количестве, обеспечивается возможность опускания горелки почти до самой подины. При этом газы проходят в ломе снизу вверх максимальное расстояние (рис. 1.22).



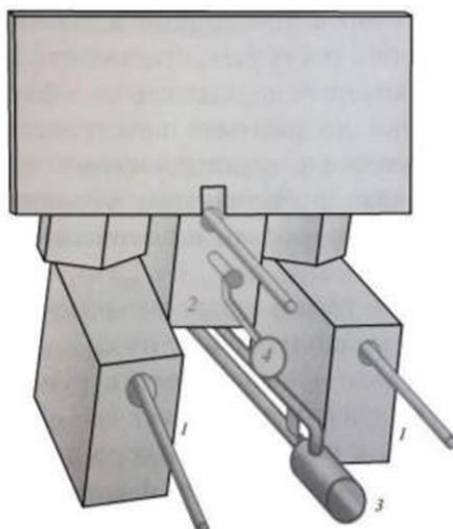
1 – водоохлаждаемая крышка; 2 – горелка; 3 – цилиндр; 4 – кронштейн; 5 – уплотнитель; 6 – механизм подъема установки; 7 – механизм отвода горелки

Рисунок 1.22 - Установка HPR-горелки в дополнительном эркере

По своему назначению механизмы стеновой горелки и их работа аналогичны эркерной горелке. Отличие заключается в механизмах подъема и опускания, для эркерных и стеновых горелок это механизм шахтного типа расположенный на рабочей площадке. Для таких горелок проектируют специальные эркерные отверстия для того чтобы была возможность применяя высокоомощные горелки.

### 1.3.2 Оконные горелки

Весьма длительный и обширный опыт использования конвенциональных оконных горелок в прошлом представляет для HPR-горелок большой интерес. Именно оконные горелки впервые наглядно показали необходимость изменений направления факела по ходу нагрева лома. Для вдувания кислорода и углерода в ванну через рабочее окно печь оборудована HPR горелками на манипуляторе BSE с расходуемыми трубками (рис. 1.23).



1 – боковые боксы; 2 – средний бокс;  
3 – головка горелки; 4 – щиток

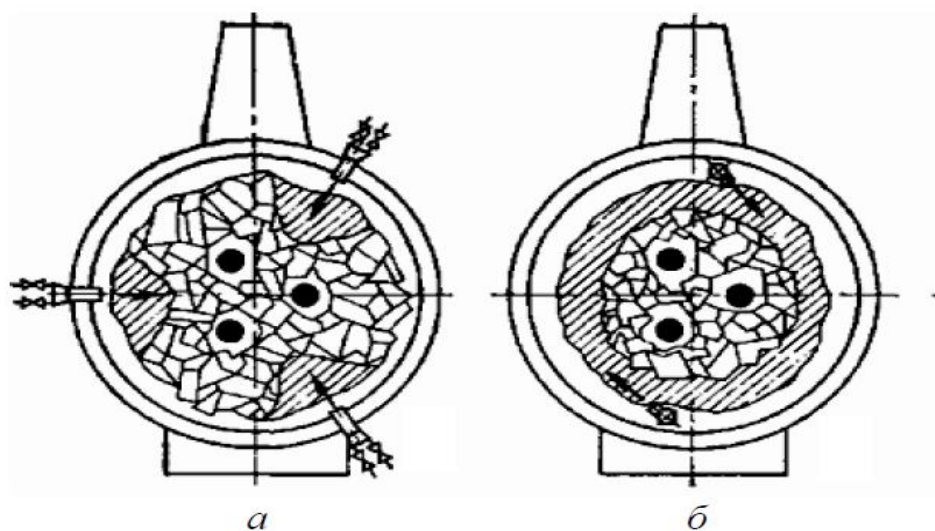
Рисунок 1.23 - HPR-горелки на манипуляторе BSE

Кислород вдувается двумя трубками, расположенными в боковых боксах, углерод – средней трубкой. Под средним боксом манипулятора установлена кислородная горелка, работающая на жидком топливе. Для нагрева лома горелка с помощью пневмоцилиндра выдвигается вперед. По окончании работы она возвращается в обратное нерабочее положение. В этом положении головка горелки закрывается щитком, что предохраняет сопла горелки от забивания брызгами металла и шлака в жидкие периоды плавки.

### 1.3.3 Сводовые горелки

Для высокотемпературного нагрева лома на больших печах были разработаны вертикальные сводовые HPR-горелки с замедленным смещением газа и кислорода и пониженной температурой факела. Эти горелки вводятся в пространство печи через отверстие в своде вблизи сводового кольца.

Горелки предназначались для печей, в завалке которых содержалось большое количество тяжеловесной прокатной обрезки. При таком ломе вблизи стен печи остается достаточно места для введения горелок (рис. 1.24).



а – стеновые ТКГ, б – поворотные ТКГ

Рисунок 1.24 – Сводчатая горелка

Сводчатые горелки могут опускаться и подниматься, а также поворачиваться вокруг вертикальной оси на  $60^\circ$  с помощью механизмов, установленных на каретке и колонне. Газовые и кислородные горелки расположены на боковой поверхности горелки под углом к ванне. При перемещениях горелки по вертикали и ее поворотах направление факела изменяется в широких пределах. Направление факелов горелок по ходу периода плавления может изменяться с помощью автоматического устройства по определенной программе, а также вручную. Это дает возможность учесть индивидуальные особенности плавок и существенно ускорить процесс [16].

#### 1.4 Использование химической энергии газов

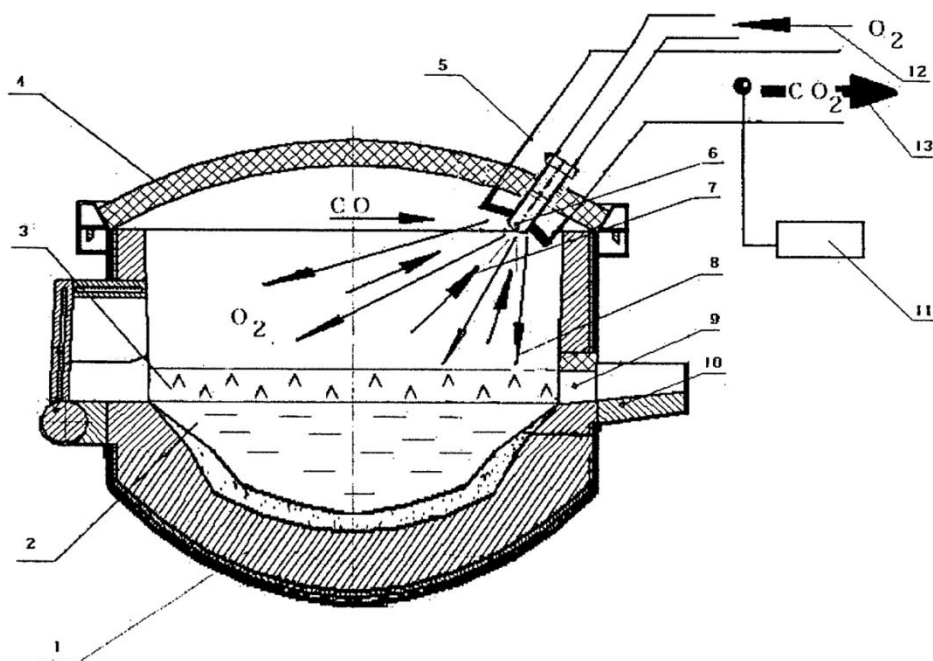
Во время окислительного периода в ДСП выделяются газы с содержанием CO до 80% и физической температурой  $1300 - 1500^\circ\text{C}$ , что говорит о наличии высокого энергетического потенциала. Дожигать отходящие газы эффективно в рабочем пространстве печи или перед установкой (Consteel), шахтами шахтных печей определенных конструкций.

Дожигают отходящие газы, с применением кислородных фурм иногда применяются комбинированные кислородные фурмы с подачей топлива (мазут, кокс, уголь) [17].

Факел дожигания выглядит следующим образом. Струя холодного кислорода в конвертере смешивается с нагретой до высокой температуры (1573-1873К) газовой фазой, состоящей в основном из СО. Вовлеченный в струю СО сгорает до СО<sub>2</sub> с изменением энтальпии системы  $\Delta H_{298}^0 = -565,64$  кДж/моль О<sub>2</sub> и образованием высокотемпературного газового факела. По мере удаления от сопла значительно изменяется состав струи (уменьшается содержание О<sub>2</sub> и увеличивается содержание СО<sub>2</sub>) за счет реакций горения и повышается температура газов. На расстоянии 100 мм от сопла она достигает 1573-1873К, а на расстоянии 200 мм – 2420-2570К. Но эти данные не учитывают физического и химического эффектов, связанных с наличием в ДСП вспененного шлака, который применяется для защиты водоохлаждаемых панелей и откосов печи от излучения электрических дуг.

В реальных производственных условиях вспенившийся шлак, даже при относительно небольшом повышении его уровня, усложняет организацию процесса дожигания СО и передачи теплоты ванне. С повышением уровня шлака струи кислорода частично отражаются его поверхностью, что нарушает характер движения газовых струй [18].

Таким образом, есть два существенных пути дожигания СО и нагрева за счет этого ванны в шлаке и верхних слоях шлака или над ванной. Для улучшения теплопередачи в металл необходимо уменьшать толщину и вспененность шлака. Действенность таких мер подтверждена работой мартеновских печей. На рисунке 1.25 приведена ДСП с дожиганием отходящих газов.



1 – ДСП, 2 – металлическая ванна, 3 –шлак,  
 4 – свод ДСП, 5 – патрубок, 6 – фурма, 7 – отходящие газы,  
 8 – завихрённая струя кислорода, 9 – летка, 10 – выпускной желоб,  
 11 – газоанализатор, 12 – поток кислорода, 13 – конечные газы

Рисунок 1.25 – Схема ДСП с фурмой для дожигания газов

### 1.5 Работа на вспененном шлаке

Один из эффективных способов снижения расхода электроэнергии, повышения теплового и электрического КПД в дуговой сталеплавильной печи (ДСП) – экранирование электрических дуг вспененным шлаком. Одним из необходимых условий вспенивания сталеплавильного шлака является интенсивное образование  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$  на границе шлак – металл.

Одним из важнейших условий формирования хорошо вспененного шлака является поддержание его основности в пределах 1,8–2,4 при следующем среднем составе шлака, %:  $\text{FeO}$  16–20;  $\text{CaO}$  46–48;  $\text{SiO}_2$  16–21;  $\text{MgO}$  8–10;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  2,0–2,5 (рис. 1.26). На основе данных о характере изменения уровня вспененного шлака было установлено, что устойчивое вспенивание шлака обеспечивается при выделении  $\text{CO}$  с удельной скоростью не менее  $10 \text{ м}^3/\text{мин}$  на  $1 \text{ м}^2$  площади ванны.

Было обнаружено также влияние степени вспенивания шлака на флуктуации фазных токов, что позволило эффективно контролировать и управлять режимом вспенивания шлака и подачи шлакообразующих (рис.1.27) [19].

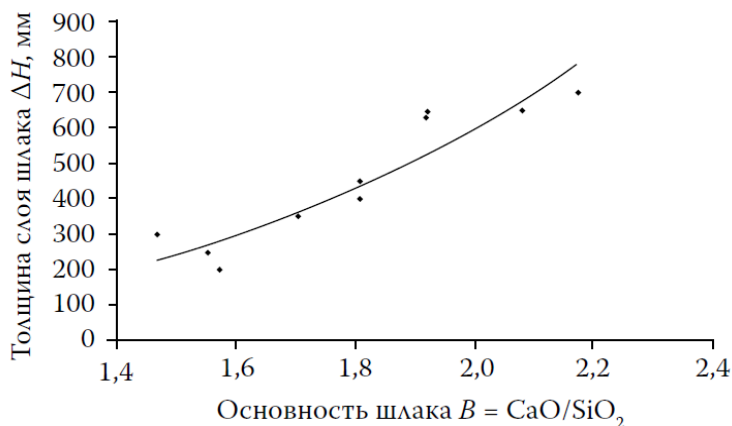


Рисунок 1.26. - Характер изменения толщины вспененного шлака в зависимости от основности

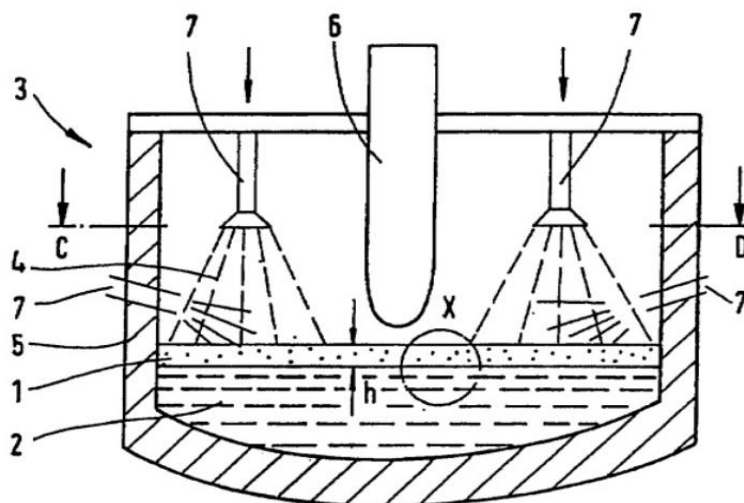


Рисунок 1.27 – Схема подачи углеродистого материала (восстановителя) на поверхность шлака

Способ включает подачу в печь (3) смеси (4), содержащей, по меньшей мере, оксид металла и углерод, причем оксид металла под находящимся шлаком (1) восстанавливается с помощью углерода. Газы, выделяющиеся при восстановлении, образуют в шлаке пузырьки, в результате чего шлак вспенивается. Для оптимального получения вспененного шлака (1) предусмотрено, чтобы подача смеси (4) в печь (3) происходила таким образом, чтобы высота (h) или интервал высоты (h)

слоя вспененного шлака (1) устанавливались и поддерживались на желательном уровне. Для этого подачу смеси (4) осуществляют на кольцевую поверхность, расположенную между электродами (6) и стенкой (5), посредством подающих устройств (7). Использование данной технологической операции обеспечивает защиту огнеупорной футеровки от излучения электрической дуги и увеличение подачи энергии в ванну расплавленного металла.

По ходу электроплавки стали в ДСП в период вспенивания шлака образуется двухфазная переходная зона. Она представляет собой систему, состоящую из взвеси капелек (корольков) металла различной величины в шлаке и капелек шлака в жидком металле. Наличие переходной зоны оказывает значительное влияние на скорость нагрева и обезуглероживания ванны. Кроме того, можно сказать, что величина переходной зоны «шлак–металл» тем больше, чем больше мощность перемешивания ванны, так как последняя в значительной степени определяется скоростью процесса окисления углерода в ванне дуговой печи [20].

## **1.6 Выводы**

*Технология “жидкий старт” (“болото”) показывает на практике:*

1. Часовая производительность печи от массы жидкого болота показал, что при идентичных условиях тепло - массообмена при увеличении массы жидкого болота производительность дуговой сталеплавильной печи всегда уменьшается

2. Проанализировав дуговые печи с порционной и непрерывной загрузкой лома было выявлено, что скорость прогрева металлической шихты и ее плавления при непрерывной подаче металлического лома в жидкое болото ( $\approx 100$  раз).

3. Потери тепловой энергии которые происходят при бурном контакте металлического лома и жидкого болота в связи с конвективным теплообменом, необходимо восполнять внешними источниками энергии.

4. Процентное соотношение массы болота от садки печи определяется исходя из мощности трансформатора печи на предприятии, внешних источниках тепловой энергии и способа загрузки лома. Перспективна непрерывная загрузка



металлической шихты, она имеет такие достоинства как: уменьшение простоев, равномерная загрузка дающая возможность протекания диффузионных процессов между ломом и болотом, увеличение производительности агрегата.

*Предварительный подогрев лома дает такие преимущества:*

- 1) Ускорение периода расплавления лома за счет внесенного физического тепла в начале плавки;
- 2) Уменьшение затрат на электроэнергию или другие виды топлива, если лом подогревался физическим теплом отходящих газов;
- 3) Сокращение продолжительности плавки из за более быстрого протекания процессов в печи;
- 4) Минимизация большой части механического воздействия лома на футеровку печи, вследствие повышения его пластичности, но только при температурах лома выше 500 °С;
- 5) Стабильность процесса выплавки при загрузке лома, потому что при прогреве лома почти вся влага испаряется, что позволяет избегать непредвиденных технологических нарушений в связи с хлопками, взрывами из – за мгновенного испарения влаги.

*Использование топливно – кислородных горелок при выплавки стали в ДСП позволяет:*

- A. Снижать затраты на электроэнергию при выплавке стали;
- B. Уменьшать продолжительность плавки за счет быстрого расплавления металлической шихты;
- C. Уменьшать содержание фосфора после выплавки, за счет быстрого окисления части лома до FeO.

Дожигание отходящих химически активных газов улучшает такие показатели:

- a) В комбинации с шахтным подогревом лома или технологией Consteel позволяет прогревать лом в шахте до более высокой температуры;
- b) Улучшает экологическую обстановку за счет минимизации воздействия газов содержащих СО, и более полное его дожигание.

с) Повышает тепловые характеристики процесса выплавки за счет введения дополнительной тепловой энергии.

*Технология вспенивания шлака разработана с такими целями:*

- I. Снижать воздействие на футерованные откосы и на водоохлаждаемые панели, излучения электрической дуги, что позволяет продлить срок службы футеровки и снизить затраты на нагнетание воды в водоохлаждаемых панелях.
- II. Отдавать тепло от излучения дуги непосредственно шлаку, тем самым улучшая тепловые показатели выплавки.

## 2 Анализ процесса плавления металлолома

### 2.1 Механизм плавления металлолома

Температурный режим продувки в ДСП, в большей мере в начале, значительно влияет на физико - химические явления в ванне. При низкой температуре металла обезуглероживание и шлакообразование замедляются, содержание окислов железа в шлаке растет.

Температурный режим продувки определяется главным образом соотношением скоростей выделения тепла от химических реакций и расходования тепла на полный переход лома в металлический расплав, а неметаллических шихтовых материалов в шлаковый расплав [21].

Количество используемого металлического лома в первую очередь отражается на общих затратах тепла, а его вид (тяжеловесный, легковесный) – на скорости расплавления. Основными показателями качества металлического лома являются стандартная и минимальная толщина его кусков. Некоторые куски легковесного лома имеют толщину порядка 1 мм (обрезь тонкого листа), в то же время толщина отдельных кусков тяжеловеса достигает 200 - 300 мм и более (обрезь блюмов и слябов).

Так как геометрическая форма и толщина кусков неодинаковы, то насыпная масса лома различна в емкостях (бадьях), которые служат для завалки его в ДСП. Масса лома в 1 м<sup>3</sup> колеблется от 0,5 (легковес) до 3 тонн (тяжеловес). Чем ближе форма кусков к правильному геометрическому телу с минимальной поверхностью (шар, куб, цилиндр) и чем меньше отличаются размеры кусков лома при достаточно больших величинах, тем выше насыпная масса последнего [22].

Максимальную насыпную массу, как правило, имеют такие отходы прокатного производства, как обрезь блюмов и слябов, а обрезь тонкого листа, проволоки, а также стружка характеризуется малой насыпной массой.

Объем лома с малой насыпной массой при данной общей заваливаемой массе повышен. Поэтому для ввода такого лома в ДСП необходимы подвалки. При этом

не только возрастает продолжительность завалки, но и наблюдаются технологические осложнения.

Чем меньше насыпная масса лома, тем больший объем ДСП после завалки он занимает, в особо неблагоприятных случаях лом может заполнять практически весь внутренний объем агрегата.

При использовании пакетированного и тяжеловесного лома описанные явления практически отсутствуют. Спрессованный в пакеты лом имеет насыпную массу до  $1,5 \text{ т/м}^3$ . Тяжеловесный лом до начала продувки практически не плавится и снижение температуры заливаемого чугуна не превышает  $10-20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Применение лома с высокой насыпной массой (более  $1,5-2 \text{ т/м}^3$ ), т.е. тяжеловесной обрезки и пресс пакетов, является одним из необходимых условий обеспечения нормального хода плавки и высоких технико-экономических показателей выплавки стали в ДСП.

Твердый металлический лом переходит в расплав в двух режимах: диффузионном и тепловом. В диффузионном режиме лом сначала науглероживается (поверхностный слой), а затем плавится в жидком металле, а в тепловом плавится. Первый режим осуществляется только в расплаве с большей концентрацией углерода, чем в ломе, и с температурой ниже температуры плавления лома (рисунок 2.1). Второй режим развивается при температуре ванны, превышающей температуру плавления лома независимо от соотношения концентраций углерода в обеих фазах.

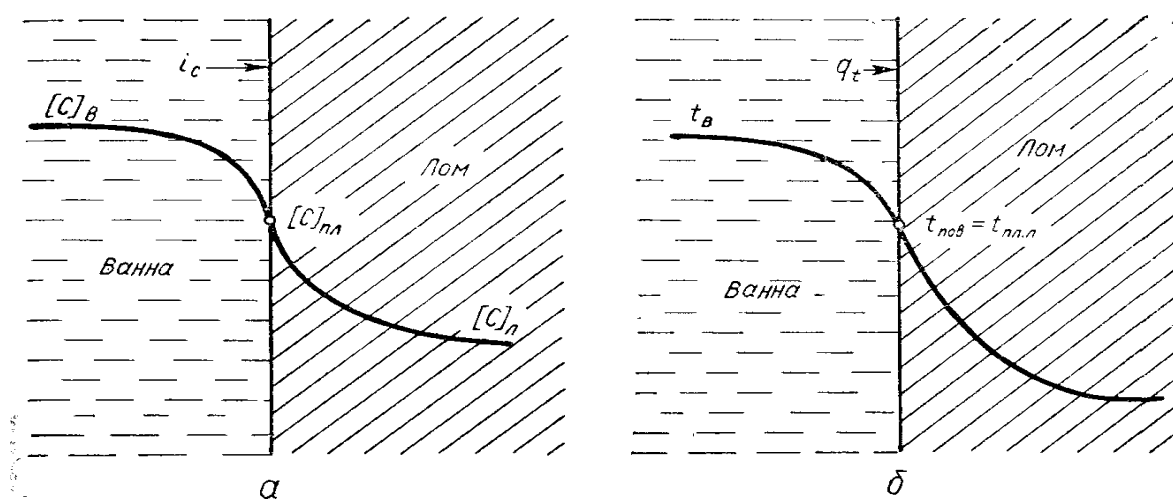


Рисунок 2.1 – Схема диффузионного растворения (а) и теплового плавления (б) лома в металлической ванне

Диффузионное растворение лома в ходе взаимодействия лома с болотом, как правило, предшествует тепловому плавлению. Взаимодействие лома с болотом и его частичное растворение осуществляется следующим образом. На части лома который загружен в ДСП намерзает слой железоуглеродистого остатка из печи. Толщина намерзающего слоя пропорциональна толщине куска лома. В ходе дальнейшего прогрева кусков лома температура намерзшего слоя повышается, и он снова переходит в расплав. Время, в течение которого на куске лома находится слой намерзшего металла, тем больше, чем толще кусок лома. Оно по расчетам колеблется в пределах от нескольких десятков секунд до 3 минут. Это является одной из причин затрудняющей переход в расплав тяжеловесного лома в начальный период продувки. Только после оплавления намерзшего на поверхности кусков слоя и установления непосредственного контакта тяжеловесного лома с жидким металлом начинается собственно его диффузионное плавление в ванне [23].

Если содержание углерода в металлической ванне  $[C]_в$  больше, чем в ломе  $[C]_л$ , то распределение концентраций в области раздела лом – расплав можно представить схемой (рисунок 2.1,а). Так как  $[C]_в > [C]_л$ , то начинается диффузия углерода в твердом ломе, в результате которой концентрация углерода в поверхностном слое лома растет, достигая  $[C]_{пл.л.}$ , достаточной, чтобы при определенной температуре ванны и поверхностного слоя лом расплавился. Согласно одним данным это температура ликвидус, другим – температура солидус. В дальнейшем устанавливается режим тепло и массопереноса, при котором процесс протекает следующим образом:

1. Массоподвод углерода из внутренних объемов расплава к границе раздела расплав – лом с удельной интенсивностью  $i$ :

$$i = \beta_c ([C]_в - [C]_{пл.л.}) \rho_M / 100,$$

где  $\beta_c$  – коэффициент массопереноса углерода в расплаве.

2. Растворение углерода в поверхностном слое лома, сопровождающееся его оплавлением и диффузией части углерода в глубь твердой фазы.

Толщина науглероженного слоя в растворяющемся ломе очень мала (доли миллиметра). Если, учитывая это, пренебречь расходом на диффузию в твердом теле

углерода, подводимого к поверхности раздела фаз, то скорость диффузионного плавления прогретого лома будет определяться внешним массопотоком  $i$ .

Для расплавления массы лома  $M$  необходимо подвести к границе раздела фаз массу углерода:

$$M = M ([C]_{\text{пл.л.}} - [C]_{\text{л.}}) \cdot 100, \quad (1)$$

где  $[C]_{\text{пл.л.}}$  – концентрация углерода в поверхностном слое, обеспечивающая его оплавление при температуре ванны.

Из предыдущих выражений вытекает уравнение массовой скорости диффузионного плавления лома:

$$\delta M / \delta \tau = - K_c S_{\text{л}} ([C]_{\text{в}} - [C]_{\text{л}}) / ([C]_{\text{л}} - [C]_{\text{с}}), \quad (2)$$

где  $S_{\text{л}}$  – поверхность контакта лома с расплавом;

$K_c$  – коэффициент массопереноса;

$[C]_{\text{л}} - [C]_{\text{с}}$  – разность содержания углерода на линиях ликвидуса и солидуса, диаграммы железо – углерод.

Наименее благоприятны условия для растворения лома в периферийных и нижних слоях ванны и участках, где могут образоваться застойные зоны, особенно в режиме плавления, когда скорость обезуглероживания равна нулю. Здесь, очевидно, определяющую роль в массопереносе играет естественная конвекция [24].

Установлено, что при увеличении размеров толщины металлолома влияние тепловых процессов на его растворение в начале плавки усиливается и ход плавления определяется суммарным действием диффузии и теплообмена [25].

Чем выше содержание углерода в ванне и ее температура, тем больше скорость растворения лома. В ходе продувки температура ванны растет, а содержание углерода падает, что стабилизирует массопоток углерода  $i$  и линейную скорость диффузионного плавления лома [26].

Когда температура ванны превысит температуру плавления ненауглероженного лома ( $t_{\text{в}} \geq t_{\text{пл.л.}}$ ), начнет развиваться (сначала параллельно диффузионному растворению, а затем быстрее его) процесс теплового плавления лома (рисунок 2.1,б). При этом из расплава к поверхности раздела жидкость – твердое тело подводится тепловой поток удельной интенсивности  $q_i$ . Часть его

расходуется на теплопередачу в твердое тело (нагрев внутренних слоев), а остальная – на оплавление поверхностного слоя (компенсацию теплоты плавления). Средняя величина удельного теплового потока при обычной интенсивности продувки [2,5-3,5 м<sup>3</sup>/(т·мин)] составляет 2-3 МВт/м<sup>2</sup>, она определяется коэффициентом теплопередачи  $\alpha$ , а также разностью температур расплава  $t_v$  и плавления лома  $t_{пл.л.}$ :

$$q_t = \alpha(t_v - t_{пл.л.}), \quad (3)$$

Тела малой толщины ( $< 0,1$  м) прогреваются быстро, затраты тепловой энергии в рассматриваемый период на нагрев общей массы металла, и тепловой поток расходуется в основном на плавление поверхностных слоев. При этом Массовая скорость плавления составляет:

$$\delta M / \delta \tau = - \alpha(t_v - t_{пл.л.})S_l / \lambda_{пл.л.} = q_t S_l / \lambda_{пл.л.}, \quad (4)$$

где  $\lambda_{пл.л.}$  – скрытая теплота плавления лома.

Коэффициент внешней теплопередачи  $\alpha$  определяется мощностью перемешивания ванны  $N_{пер.}$ , т.е. скоростью окисления углерода  $V_c$ :

$$\alpha = k_1 N_{пер.}^m = k_2 (TV_c)^m, \quad (5)$$

где  $k_1, k_2$  – коэффициенты пропорциональности.

Увеличение коэффициента  $\alpha$  и температуры ванны обуславливает повышение скорости теплового плавления лома. Однако и течение основной части рассматриваемого периода значения  $q_t$  и линейной скорости плавления лома изменяются в небольших пределах. Средняя линейная скорость теплового плавления лома в 4-5 раз больше средней скорости его диффузионного растворения.

При увеличении толщины кусков лома их прогрев и плавление значительно удлиняются, особенно в участках ванны с низкой интенсивностью движения и теплоподвода. Выражения для определения скорости усвоения и количества перешедшего в расплав лома в режимах диффузионного растворения и теплового плавления имеют сходную структуру. Если в уравнениях по расчету скорости плавления лома предположить, что величины, которые обычно мало изменяются в течение периодов плавления ( $\lambda_{пл.л.}$ ,  $([C]_{пл.л.} - [C]_{л.})$ ), постоянны и принять их средние значения, то за время  $\delta t$  расплавится масса лома:

$$\delta M \approx - i S \delta t; \quad (6)$$

$$\delta M \approx -qS\delta t, \quad (7)$$

Так как процессы тепло- и массопереноса в общем случае аналогичны, можно записать:

$$\delta M \sim qS\delta t, \quad (8)$$

В течение продувки и плавления наиболее сильно из всех переменных изменяется поверхность контакта кусков лома с расплавом  $S$ :

$$S \sim \gamma (M_{\text{л.нач.}} - \Delta M)^n \sim \gamma M_{\text{н.л.}}^n, \quad (9)$$

где  $\gamma$  – коэффициент формы кусков;

$\Delta M$  – масса расплавившегося лома;

$n$  – показатель степени.

Если площадь поверхности лома при контакте с расплавом максимальна, то  $n = 2/3$ . Однако в реальных условиях, когда часть кусков лома находится в расплаве один на другом и они оседают (спрессовываются) в ванне, лишь доля поверхности лома контактирует с расплавом. В этом случае можно принять  $n = 1/2$ . Наиболее близок к фактическим условиям, очевидно, промежуточный случай, когда  $n = 0,6$ . На рисунке 2.2 приведена динамика плавления тяжеловесного лома [27].

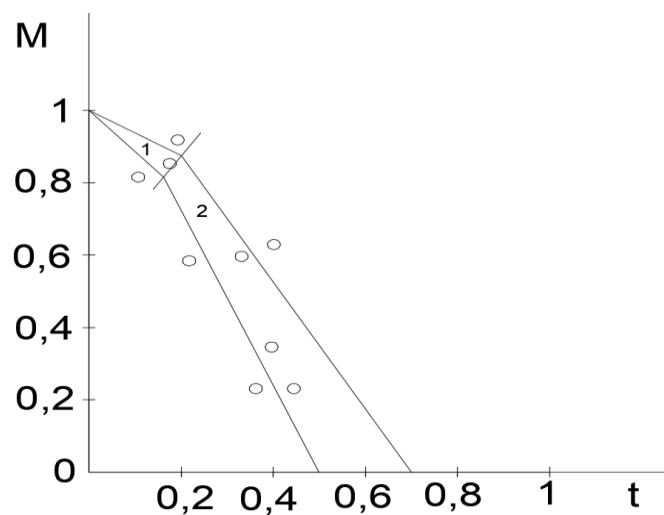


Рисунок 2.2 – Динамика плавления тяжеловесного лома в ДСП

Достаточно четко видно деление процесса плавления лома на два периода: диффузионный и тепловой. В начале второго периода интенсивность перехода лома в расплав значительно выше, чем в первом.



Продолжительность периода диффузионного растворения тяжеловесного лома  $t$  составляет 20 – 40% от продолжительности плавки. За это время растворяется около 20 - 35% всей массы лома, остальная часть переходит в расплав в период теплового плавления лома. Примерное равенство этих долей при большом различии линейных скоростей плавления лома в рассматриваемых периодах обусловлено уменьшением поверхности его кусков к периоду теплового плавления. По данным некоторых детальнейших исследований, скорость перехода лома в расплав в начальной стадии  $t_{нач}$  первого периода выше, чем в дальнейшем. Это связано с быстрым переходом в расплав лома, попавшего при завалке в пределы реакционных зон, а также, очевидно, с тем, что в период завалки часть лома (15% - 40% в зависимости от массы болота) значительно прогревается [28].

Усвоение легковесного лома и пакетов завершается при температуре расплава менее 1500 °С и протекает преимущественно в диффузионном режиме. Плавление пакетированного лома имеет свои особенности. Наличие зазоров между отдельными кусками лома в пресс - пакете обуславливает снижение его средней теплопроводности, особенно в начале прогрева. В этой стадии прогрев и плавление пакета можно рассчитывать по отдельным слоям, ограниченными зазорами. Пресс-пакет рассыпается в расплаве на куски (через 30-40% от времени плавки). После этого скорость плавления значительно увеличивается, его продолжительность для пакета в целом определяется временем плавления куска, имеющего максимальную толщину.

Максимальная относительная длительность плавления лома в % от времени плавки ориентировочно приведены на таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Время расплавление различных видов лома

Вид лома	Время плавления от времени плавки
Легковесный (сечение > 0,04·0,04м)	15%
Пресс-пакеты или куски (0,08·0,08м)	40%
Тяжеловесный (0,3·0,03м)	70%

При использовании предварительно подогретого лома до 300 – 400 °С скорость его плавления в болоте повышается. В рассматриваемом случае возрастает

также доля лома, перешедшего в расплав в результате диффузионного растворения [29].

## 2.2 Исследование термодинамики и кинетики растворения лома в железоуглеродистом расплаве

Исследование термодинамики и кинетики проводились на установке, состоящей из печи Таммана и муфельной электропечи, при температуре чугуна 1350°C, температуре лома 25°C, производилось по три опыта на один исследуемый параметр при средней продолжительности опыта 30 с, в таблицах приведены средние значения результатов опытов. В качестве жидкого болота в котором растворялся лом применялся чугун потому, что данная лабораторная установка имеет ограниченную мощность.

Общая длина заготовки 24 мм, диаметр 9 мм, масса заготовки 12,75 г, площадь боковой поверхности заготовки 678,24 мм<sup>2</sup>, площадь торца заготовки 63,58 мм<sup>2</sup>, площадь контакта жидкого чугуна и заготовки 346,18 мм<sup>2</sup>. Химический состав передельного чугуна и заготовки марки А11 приведены на таблицах 2.2,2.3.

Таблица 2.2 – Химический состав применяемого передельного чугуна

Элемент	C	Si	Mn	S	P
Содержание, %	4,3	0,6	0,7	0,032	0,83

Таблица 2.3 – Химический состав стали марки А11

Элемент	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Cu
Содержание, %	0,07-0,15	до 0,01	0,8-1,2	0,15-0,25	0,06-0,012	до 0,25	до 0,25	до 0,25

Таблица 2.4 – Влияние температуры болота на растворимость лома

Температура болота, °C	Лома растворилось, %
1300	16,35
1350	21,18
1400	64,06

Зависимость усвоения лома жидкой фазой от ее температуры приведена на рисунке 2.3.

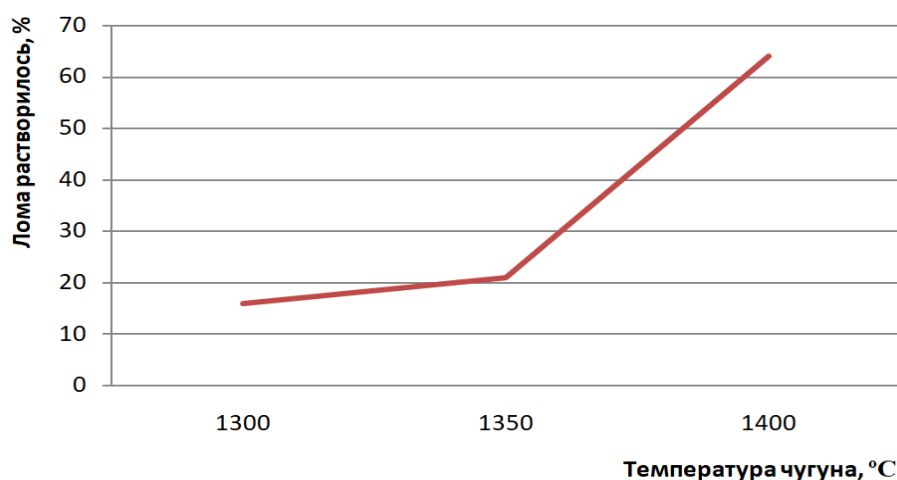


Рисунок 2.3 - Влияние температуры «болота» на растворимость лома

Таблица 2.5 – Влияние температуры лома на его растворимость в болоте

Температура лома, °C	Лома растворилось, %
200	25,50
400	57,67
600	64,98

Степень усвоения лома металлическим расплавом в зависимости от его температуры приведена на рисунке 2.4.

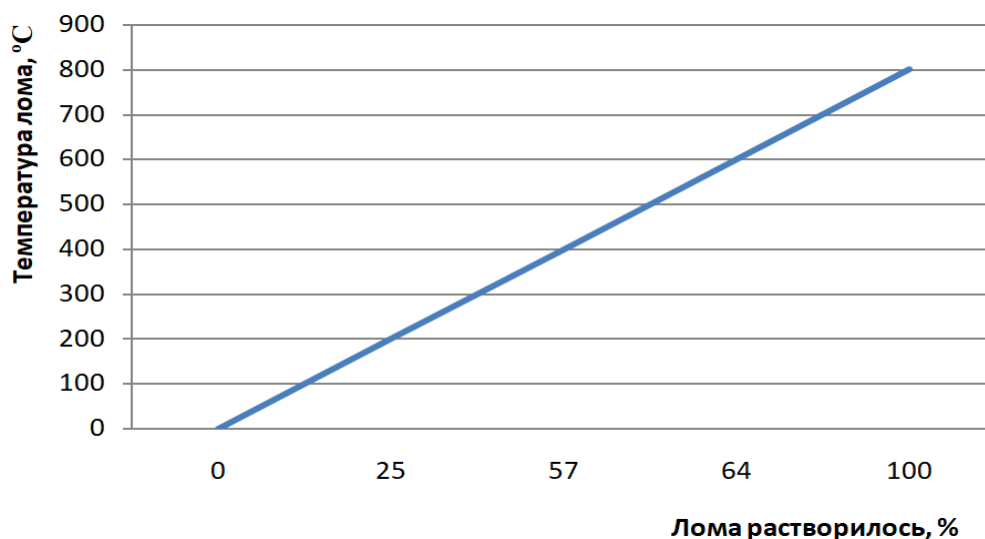


Рисунок 2.4 – Влияние температуры лома на его растворимость в «болоте»

Таблица 2.6 – Влияние скорости вращения лома на его растворимость в болоте

Скорость вращения, об/мин	Лома растворилось, %
0	21,18
25	29,42
50	57,78

Влияние массообменных процессов происходящих между металлическим ломом и жидким расплавом приведено на рисунке 2.5.

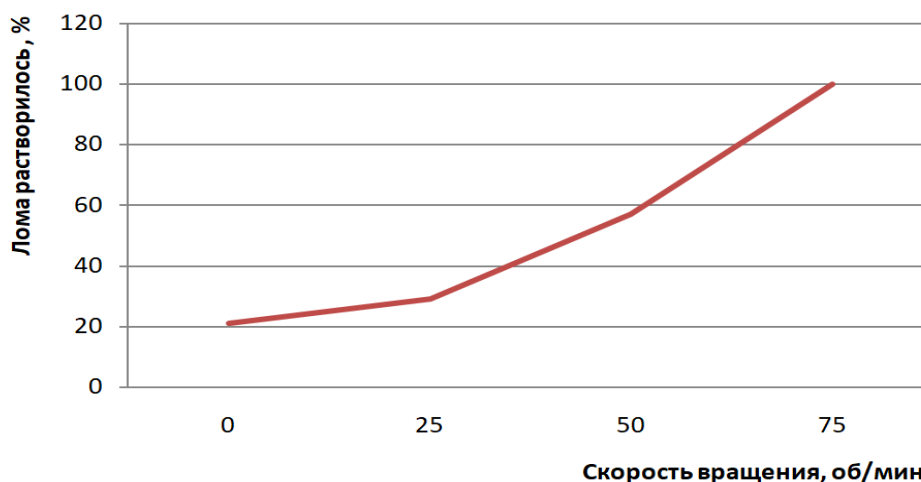


Рисунок 2.5 - Влияние скорости вращения лома на его растворимость в «болоте»

Таблица 2.7 – Кинетика диффузионного растворения лома в болоте

Время, с	Лома растворилось, %
15	6,47
30	21,18
45	23,78
60	37,89
75	84,98

Кинетика диффузионного процесса науглероживания поверхностных слоев металлического лома и ее влияние на его растворимость приведена на рисунке 2.6.

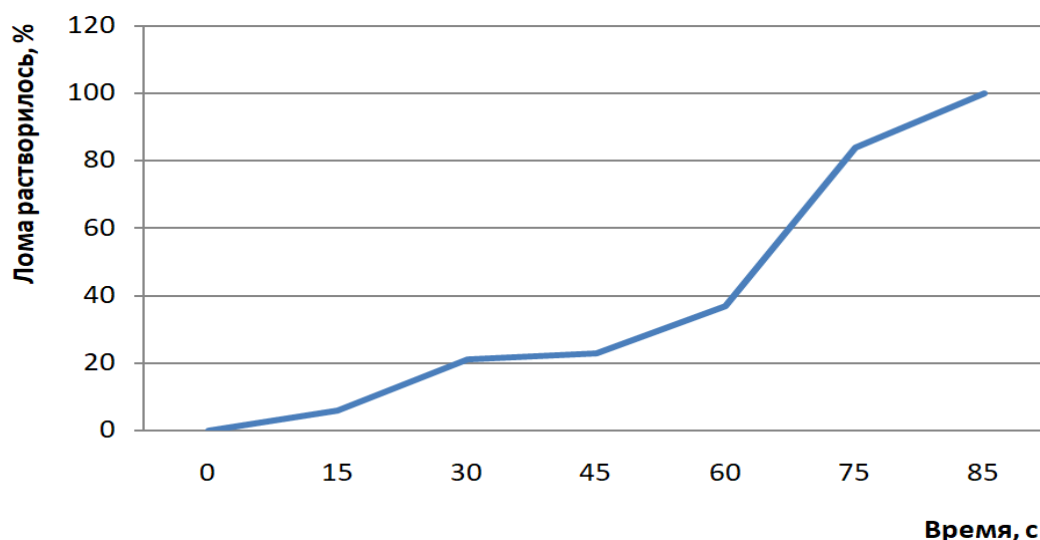


Рисунок 2.6 - Кинетика диффузионного растворения лома в болоте

Установлено, что наиболее существенно влияют на растворение лома в чугуна такие параметры: температура жидкого болота 1400 °С, температура лома 600 °С и выше, скорость вращения лома (интенсивность циркуляционных потоков в ванне) 50 об/мин, время на диффузионное растворение более 75 с.

В связи с тем, что такими параметрами как время и скорость вращения лома невозможно манипулировать, так как это обусловлено механизмом физико-химических процессов. Приходится рассмотреть два оставшихся параметра, и как возможно их увеличить.

Увеличить температуру жидкого болота возможно если увеличить технологическую температуру стали на выпуске из ДСП, но это может повлечь за собой ухудшение качества стали и материальные потери за счет быстрого разрушения огнеупоров в сталеразливочных ковшах и промковшах.

Увеличить температуру лома можно применяя: технологии предварительного подогрева лома отходящими газами, подогревом лома на специальных установках непосредственно в бадьях, подогрев уже загруженного лома в печь горелками. Исходя из этих вариантов, сразу становится понятным, что более дешево и выгоднее будет повышать температуру лома, чем болота.

## 2.3 Выводы

1. Механизм плавления металлолома показывает, легковесный лом легко набирает тепловую энергию от взаимодействия с жидкой высокотемпературной фазой и его расплавление происходит в большей мере в диффузионном режиме за счет его большой площади активной поверхности. Взаимодействие тяжеловесного лома протекает в большей степени в тепловом режиме из-за того, что скорость диффузии углерода протекает медленно при большой толщине лома.

2. В ходе исследования термодинамики и кинетики растворения металлического лома в железоуглеродистом расплаве установлено, что наиболее существенно влияют на растворение лома в чугунах такие параметры: температура жидкого чугуна 1400 °С, температура лома 600 °С и выше, скорость вращения лома (интенсивность циркуляционных потоков в ванне) 50 об/мин, время на диффузионное растворение более 75 с.

### 3 Разработка энергосберегающей технологии

#### 3.1 Анализ эффективности технологии Consteel

Энергоэффективность процесса Consteel оценивается исходя из данных теплового (рисунок 3.1, 3.2) и материального баланса (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Материальный баланс плавки в ДСП по технологии Consteel

Приход	Рассчитано, кг	Факт, кг	Расход	Рассчитано, кг	Факт, кг
Лом	78800	78800	Металл	117941,1	118300
Скрап	53500	53500	Шлак	23258,61	21600
Известь	7517,42	9000	Газы	10559,25	
В т. ч. В период плавления	4000		СО	8527,09 (80,7%)	
В период окисления	3517,42		СО <sub>2</sub>	1597,35 (15,2%)	
ДОЛОМИТ	700	700	Н <sub>2</sub>	0,59 (1%)	
УСМ	2878	2878	Н	379,80 (3,6%)	
Уголь	1200	1200	SO <sub>2</sub>	54,42 (1%)	
Электроды	170,27		ПЫЛЬ	734,47	
Воздух	2452,03		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	721,15	
Технический O <sub>2</sub>	6162,46	5827	Ni	1,26	
В т. ч. В период окисления	899,64		Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,06	
На десульфурацию	14,24		Итого	152493,4	139900
На сжигание УСМ	3768,04		Невязка, %	0,58	
На сжигание угля	1600		Выход годного, %	89,15	
Болото	0				
Итого	153380,2	151905			

Энергетический баланс процесса Consteel приведен на рисунке 3.1, 3.2.

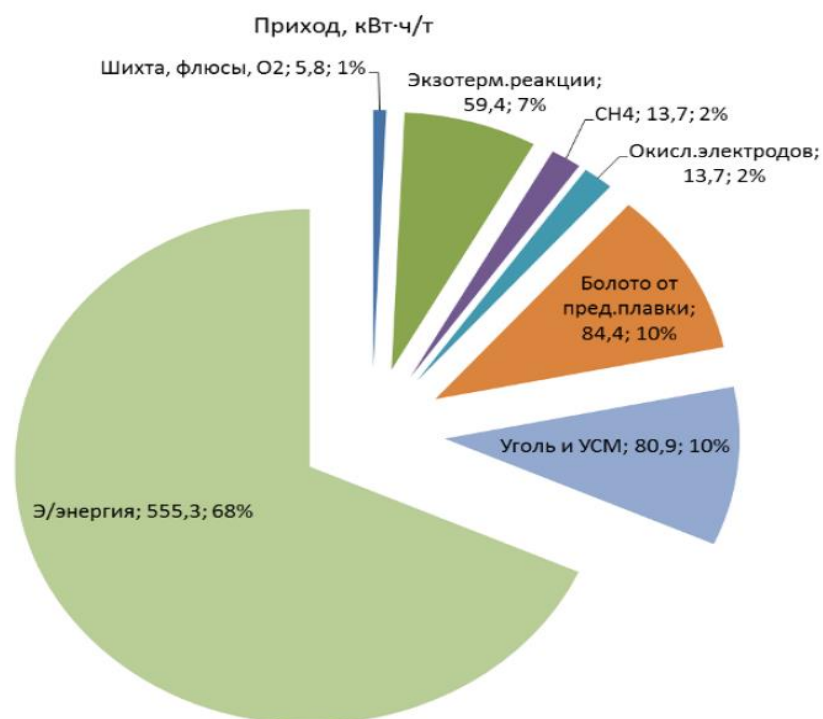


Рисунок 3.1 – Приходная часть энергетического баланса

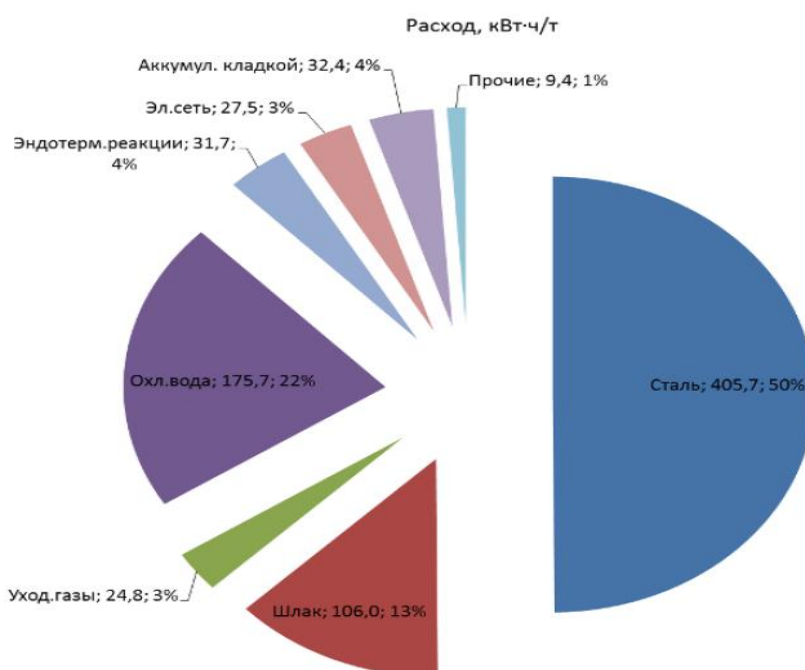


Рисунок 3.2 – Расходная часть энергетического баланса

Анализ энергетического баланса позволяет сделать следующие выводы.

Во-первых, нагрев в конвейерном подогревателе осуществляется неэффективно. Связано это, в первую очередь, с режимом движения дымовых газов в конвейерном блоке, при котором, дымовые газы движутся сверху над нагреваемой



шихтой, без проникновения вглубь слоя шихты. Малая эффективность нагрева также может быть обусловлена как периодически поступающими кусками скрапа крупных размеров, так и незначительным количеством самих дымовых газов – 75 кг/т. Максимальная температура подогрева шихты, которую можно достичь при таком количестве дымовых газов со степенью усвоения тепла при нагреве 50%, по оценкам составляет не более 150 °С [30].

Во-вторых, значительные тепловые потери с охлаждающей водой (22%), наводят на мысль о необходимости использования в печи неводоохлаждаемых конструкций [31].

В-третьих, значительное количество тепловой энергии тратится на нагрев и плавление неметаллической составляющей шихты. На сегодняшний момент энергетические затраты окупаются низкой стоимостью скрапа, т.к. он примерно в два раза дешевле амортизационного лома и использование скрапа в шихте без какой-либо предварительной обработки, экономически оправдано. Однако уже сегодня необходимо рассматривать пути использования физического тепла шлака для снижения этих затрат.

Тем самым если подогреватель Consteel футеровать и оставить только водоохлаждаемый конвейер, уже можно добиться существенного снижения энергопотерь, уносимых водой [32].

### **3.2 Анализ эффективности применения топливно – кислородных горелок**

К настоящему моменту предложены и частично используются следующие способы увеличения расхода альтернативных теплоносителей при расплавлении лома:

- увеличение количества стеновых горелок в электропечи без увеличения их единичной мощности;
- применение горелок, позволяющих изменять направление факела с увеличенной единичной мощностью;

- разделение времени работы топливокислородных горелок и электрических дуг (двухстадийный процесс плавки в электропечи; концепция FAF – топливно – дуговой печи);
- разделение в пространстве сжигания топлива и работы электрических дуг (агрегат SMS Demag и др.).

Каждое из этих технологических решений имеет свои преимущества и недостатки и применяется на производстве исходя из технологических особенностей предприятия [33].

Увеличение числа горелок создает определенные трудности по их размещению в стенах печи увеличивает затраты на обслуживание печной установки. Несмотря на это, известна успешно работающая 90 – тонная печь Danarc, на которой установлены 12 горелок общей мощностью 42 МВт.

Удобнее и эффективнее увеличивать единичную мощность газокислородных горелок, сделав их поворотными, способными изменять направление факела в значительных пределах. В ходе работы такой топливно – кислородной горелки факел горения может перемещаться от горячих зон металлического лома к холодным. Данные горелки имеют высокую мощность которая ограничена лишь газодинамическими показателями пространства печи [34].

Сводные поворотные горелки сложны в обслуживании, и в настоящее время их не применяют.

Более эффективным вариантом воплощения идеи изменяющегося направления факела является установка высокомошной поворотной горелки в имеющемся эркере печи и рабочем окне. Горелка вводится в эксплуатацию через верхнее отверстие в эркере печи, после работы она размещается на рабочей площадке.

Еще большее увеличение доли альтернативного тепла от сжигания природного газа может быть достигнуто в дуговых печах со специально устроенными эркерами для ввода в рабочее пространство печи мощных поворотных газокислородных горелок [35].

На рисунке 3.3 приведена схема установки высокомошных топливно – кислородных горелок.

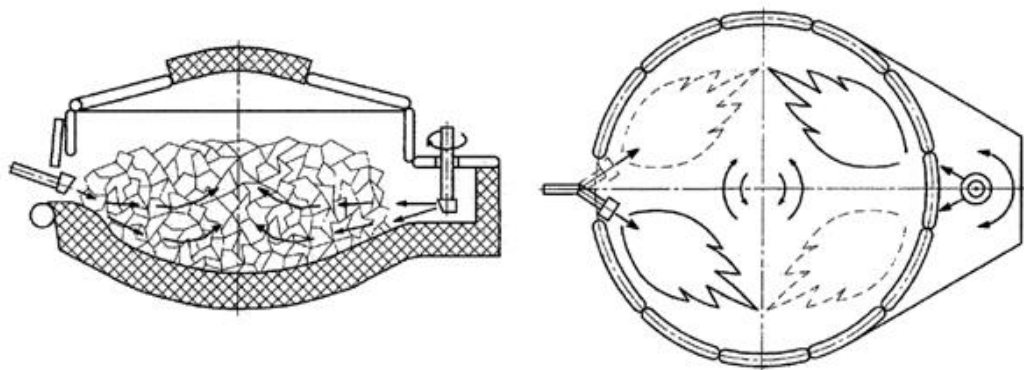
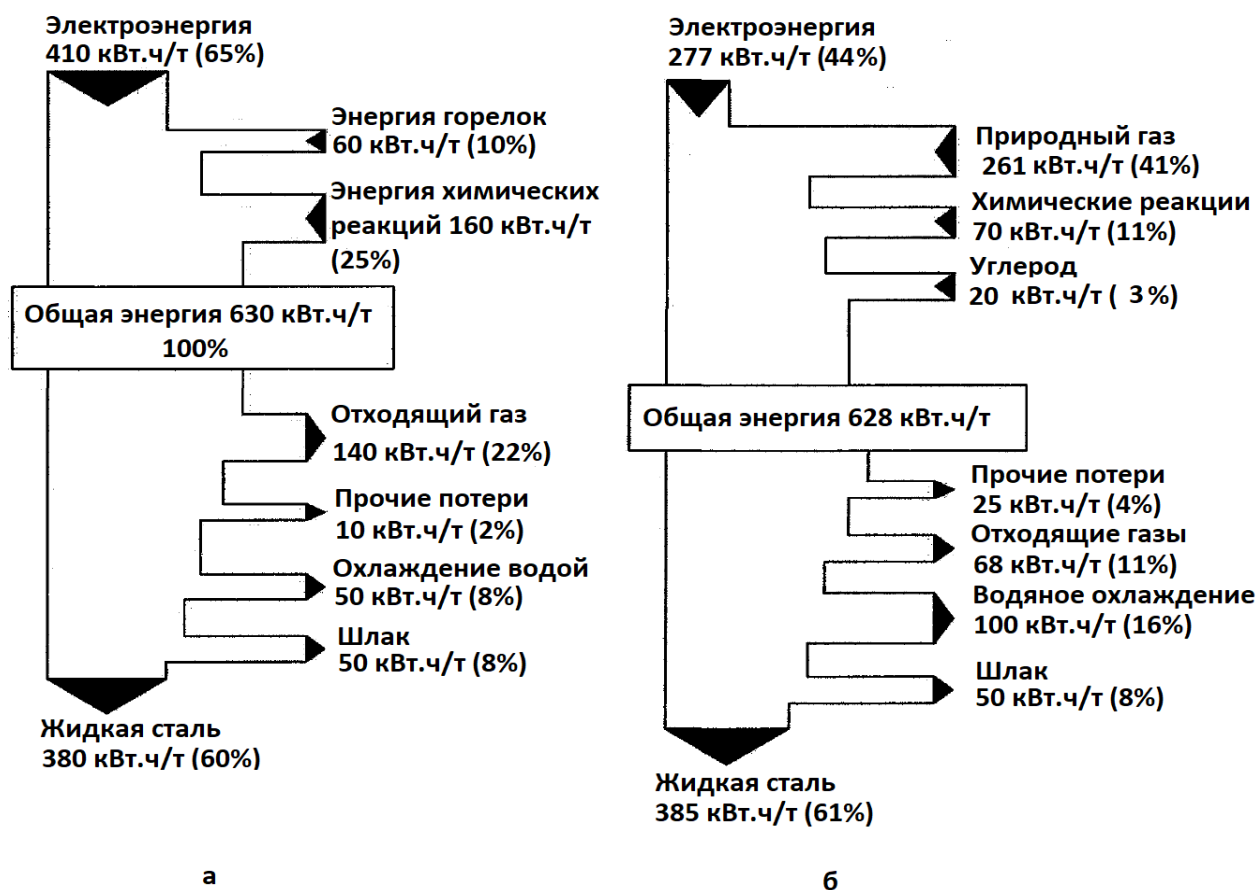


Рисунок 3.3 – Расположение ТСУ в рабочем окне и эркере

При стандартной технологии выплавки большую часть энергии вносит электрическая часть, при технологии с применением высокоэффективных горелок эта часть энергии почти приравнивается к энергии вносимой топливом (рисунок 3.4).



а – тепловой баланс без применения высокомоощных поворотных горелок, б – тепловой баланс с применением высокомоощных поворотных горелок

Рисунок 3.4 – Тепловые балансы плавки в ДСП

Газокислородные горелки должны дополнительно подавать угольную пыль для того чтобы интенсивность теплопередачи была на высоком уровне, так как горение угольной пыли в пропано – кислородном факеле повышает его светимость (излучение), тем самым оптимизируя способ передачи тепловой энергии непосредственно от факела горения до металлического лома даст существенный прирост к доле энергии, вносимой горелками, в тепловом балансе плавки [36].

### **3.3 Анализ эффективности процесса дожигания отходящих газов**

При выплавке стали в дуговой печи обычно теряется большое количество энергии с технологическими газами. Дожигание монооксида углерода в печи за счет вдувания кислорода и оптимальная передача теплоты стальному лому или расплавленной стали обеспечивает более эффективное использование энергии. При создании систем дожигания в ДСП следует учитывать, что высокое содержание монооксида углерода в отходящих газах может создать опасность взрывов и механического повреждения трубопровода отвода горячих технологических газов. При дожигании технологических газов возникают следующие основные трудности:

- изменение условий теплопередачи при переходе от нагрева твердого лома к нагреву жидкой стали, покрытой изолирующим слоем шлака;
- подсос воздуха, приводящий к неэффективному горению монооксида углерода;
- большой боковой износ графитовых электродов под воздействием окислительной атмосферы;
- малое время нахождения газов в печи;
- обратная реакция перехода диоксида углерода в монооксид углерода при взаимодействии железа и шлака [37].

Успешное обеспечение всех преимуществ, связанных с дожиганием может быть достигнуто только при разработке эффективного способа вдувания кислорода.

Эффективность дожигания в дуговой печи в значительной мере определяется степенью смешивания вдуваемого кислорода и монооксида углерода,

обеспечивающего полное горение газа. Очень важной при этом отношений является разработка надежной системы экспресс-анализа отходящих газов, позволяющей непрерывно контролировать состав газов по ходу плавки. Анализ отходящих газов показал, что содержание монооксида углерода превышает 35 % при введении углерода через водоохлаждаемую фурму или незначительном отводе горячего газа [38]. На рисунке 3.5 приведен механизм дожигания CO.

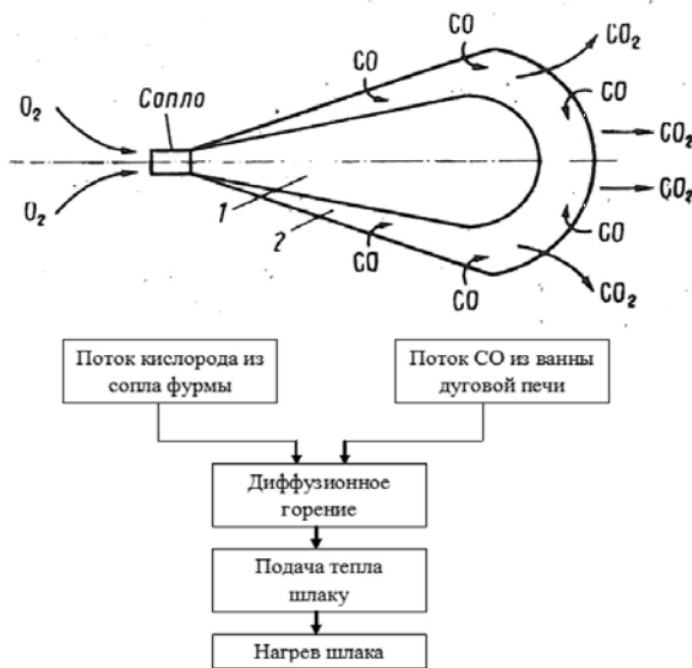


Рисунок 3.5 – Принципиальная схема механизма дожигания CO

В этих условиях протекание газозафазных реакций в печи может привести к сильному выносу отходящих газов. Следовательно, при разработке процесса дожигания необходимо учитывать три отдельных фактора:

- выделение и горение монооксида углерода в начале плавки;
- горение монооксида углерода на стадии жидкой ванны;
- создание эффективных методов обогащения газа кислородом или вдувания кислорода в печь.

Обычно используют четыре основных способа обогащения газа кислородом:

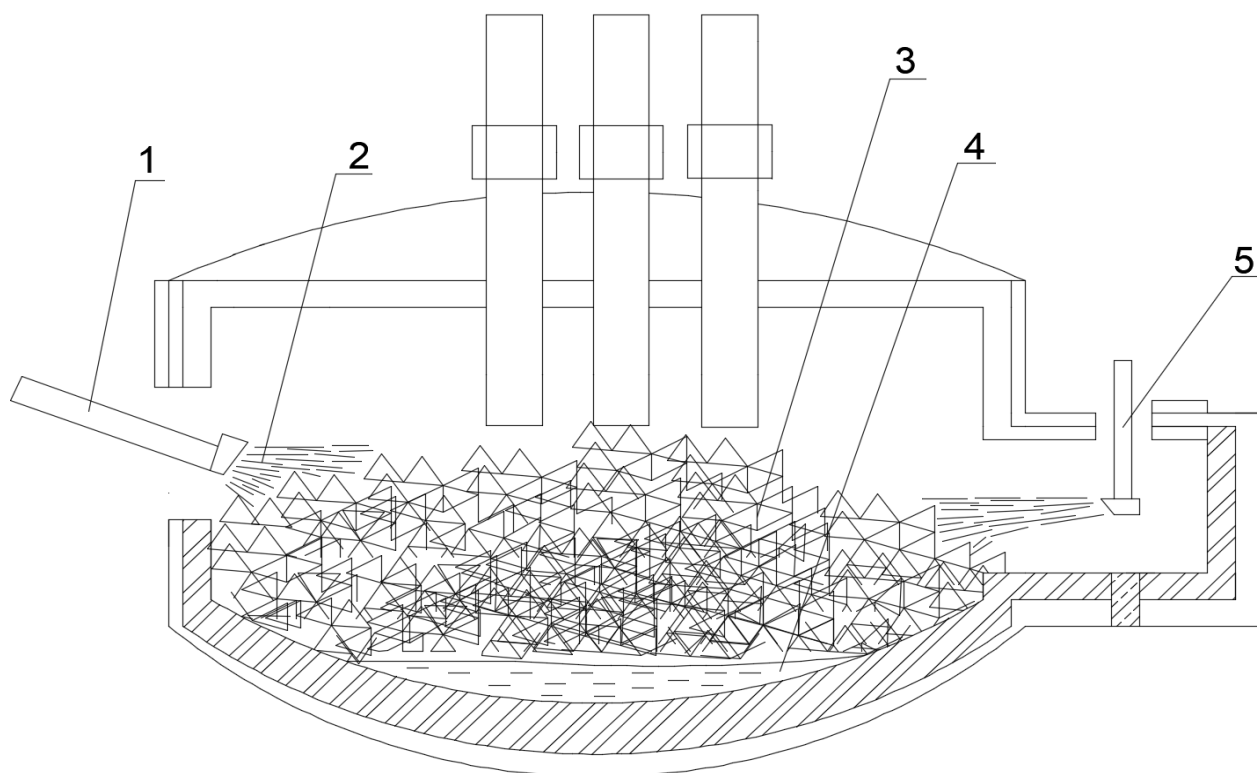
- использование горелок при сверхстехиометрическом соотношении кислорода и топлива;
- применение горелок для вдувания только кислорода;

- увеличение расхода кислорода через водоохлаждаемую фурму, вводимую через дверцу;
- установка дополнительных фурм или топливнокислородных горелок [39].

При использовании технологии плавки в ДСП с применением кислородной фурмы имеют место следующие особенности. Использование энергии, выделяющейся при дожигании, в начале цикла плавки было обеспечено при вдувании углерода через сводовую фурму. Водоохлаждаемая кислородная фурма с соплом, обеспечивающим плоскую струю, была размещена в своде печи. Она расположена таким образом, чтобы с помощью широкой струи кислорода можно было завершить горение углерода, вдуваемого через сводовую фурму, и чтобы лом в печи мог поглотить выделившуюся при этом теплоту. Вдувание кислорода через сводовую фурму также способствует дожиганию газов в период жидкой ванны, причем содержание монооксида углерода в отходящих газах можно поддерживать на уровне, меньшем 10 %. Расход вдуваемого через сводовую фурму углерода был ограничен максимальной величиной 40 кг/мин [40].

### **3.4 Эффективная энергосберегающая технология**

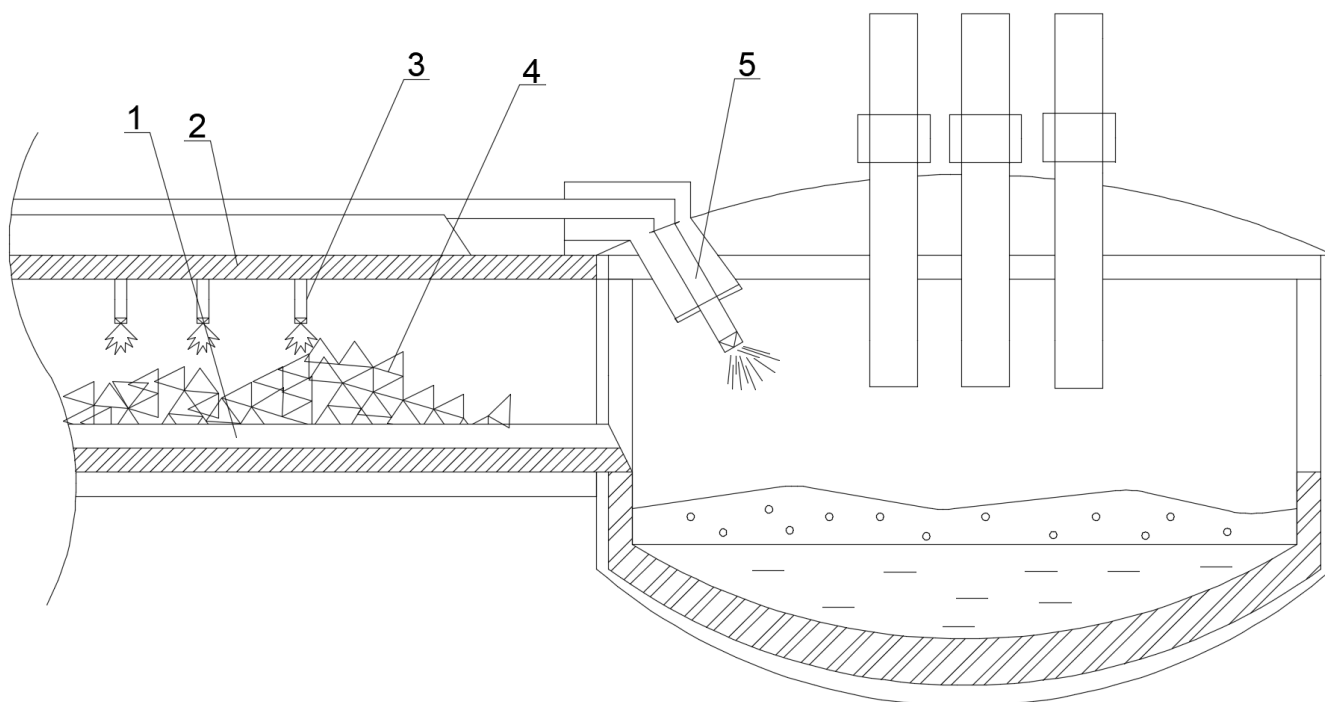
Проанализировав, множество вариантов энергосберегающих технологий выплавки стали в ДСП по научным статьям и патентам на изобретение, выбор остановился на нескольких технологиях: Подогрев лома отходящими газами, дожигание отходящих во время окислительного периода газов, сжигание углеродистого топлива с применением кислородной фурмы, применение топливно – кислородных поворотных горелок в период плавления лома. На рисунке 3.6 приведена схема работы предложенной эркерной и оконной горелки.



1 – оконная поворотная фурма, 2 – топливно – кислородная фурма, 3 –  
металлический лом, 4 – жидкое болото, 5 – эркерная поворотная горелка

Рисунок 3.6 – Схема работы эркерной и оконной горелки в период расплавления  
лома

Применение высокомоощных поворотных горелок легко осуществляется с большим размером газохода, при обычной технологии выплавки стали было бы необходимо увеличивать размер газохода и размеры газоочистных сооружений исходя из того что возрастает объем подаваемых в печь газов. Печь работающая по технологии Consteel имеет расширенный газоход который может работать с довольно большим объемом поступающих газов. Именно поэтому необходимо по максимуму использовать возможность применения технологий с использованием большого количества топлива. На рисунке 3.7 приведена схема работы печи по технологии Consteel с дожиганием отходящих газов.



1 – водоохлаждаемый конвейер, 2 – футеровка, 3 – топливно – кислородная горелка, 4 – металлический лом, 5 – топливно – кислородная фурма

Рисунок 3.7 – Схема работы печи Consteel и дожигающей СО фурмы в окислительный период

Рассмотрим все этапы разработанной технологии выплавки стали в ДСП, непосредственно после выпуска плавки:

1. загрузка подогретых шихтовых материалов с помощью конвейера, когда половина лома отгрузилась на болото в работу включается топливно – кислородная фурма, расположенная на своде печи, она будет дополнительно подогреть подгружаемый лом и расплавлять уже загруженный;
2. период расплавления лома, печь работает на максимальной мощности, в работу включаются горелки оплавливающие часть лома и прогревающие общую массу лома;
3. окислительный период, общая масса металла в жидком виде, шлак частично наведен, горелки выводятся из работы, топливно – кислородная фурма переводится на режим дожигания (подача углеродистого топлива останавливается), через свод либо рабочее окно опускается кислородная фурма до рабочего положения и начинается продувка.



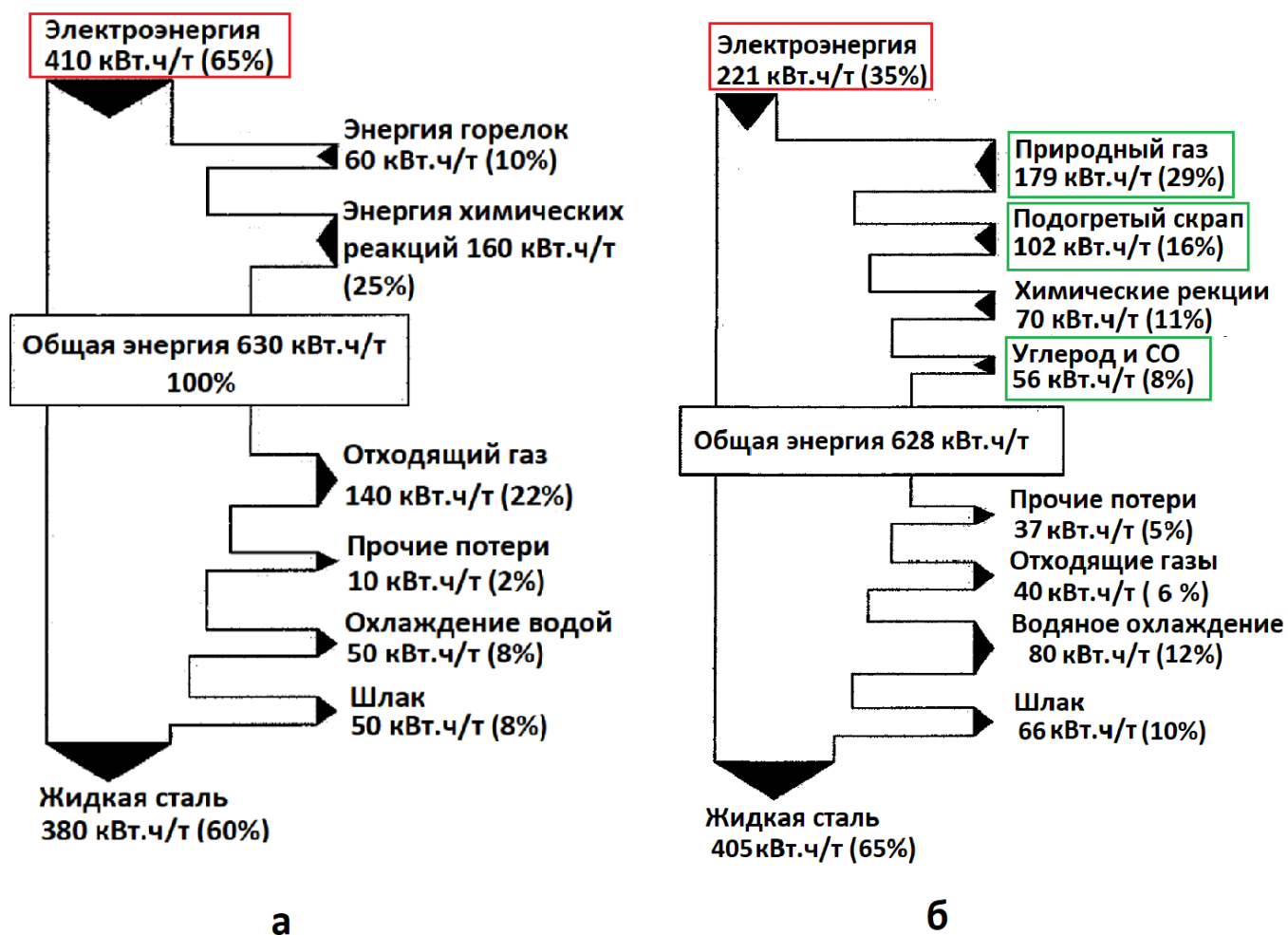
4. после окончания продувки проводится отбор проб химического состава и замер температуры металла, если полупродукт доведен до нужных кондиций начинается выпуск шлака через рабочее окно печи, после выпуска шлака прожигается эркерное леточное отверстие и производится выпуск металла в стальковш находящийся на стелевозе.
5. произведя выпуск, печь возвращается в рабочее положение с оставшейся частью металла и шлака, часть металла варьируется в зависимости от мощностей цеха определяемой пропускной способностью внепечной обработки и МНЛЗ. Обычно если емкость ДСП 200 то болото 40 - 50%, если емкость ДСП 100 то болото 15 – 30 %. Далее цикл плавки начинается сначала.

Работа горелок в шахте Consteel начинается после окислительного периода так как объем поступающих горячих газов уменьшается в разы и необходимо держать температуру лома на одном уровне во всем объеме. Лом подогревается до 400 – 600 °С это связано с тем что конвейер водоохлаждаемый и он отводит некоторую часть энергии, которая могла накапливаться в металлическом ломе. Как показывает практика Ашинского металлургического завода если оставлять камеру Consteel с водоохлаждаемыми панелями, то лом прогревается в среднем 250 – 350. Конвейерная технология подачи лома в печь несовершенна из за условий работы конвейера Consteel его необходимо охлаждать, тем самым теряется часть теплоты. Охлаждение конвейера необходимо в замкнутой системе для того чтобы забирать меньшее количество теплоты, так как замкнутая система охлаждения позволяет работать при повышенной температуре жидкости, дает возможность охладителю закипать.

Поэтому в предложенной технологии камера подачи лома зафутерована огнеупорными кирпичами с повышенной теплоизоляционной способностью.

Топливоно – кислородная фурма в режиме дожигания за счет завихрителя кислородного потока образует факел смеси газов  $O_2$  и  $CO$ ,  $H_2$ , температура факела варьируется от 2000 до 2500 °С, и напрямую зависит содержания отходящих газов, а содержание газов в свою очередь определяется составом шихтовых материалов и технологии выплавки стали.

На рисунке 3.8 приведено сравнение энергетического баланса стандартной технологии выплавки и энергосберегающей технологии.



а – стандартная технология, б – энергосберегающая технология

Рисунок 3.8 – Сравнение энергетических балансов

Применение всех этих технологических решений позволит сократить расход электроэнергии на 30% за счет ее замещения тепловой энергией вводимой топливом и за счет снижения потерь тепла с отходящими газами.

Контроль за состоянием футеровки, как печи, так и подогревателя будет осуществляться во время простоев и автоматически за счет измерения температуры кожуха печи и замера температуры воды в водоохлаждаемых элементах конструкции. Износ футеровки будет повышен в областях применения поворотных горелок, и топливно – кислородной фурмы и в шлаковом поясе на откосах печи.

Ремонты будут осуществляться во время простоев печи, в зависимости от технологий ремонта выбранного предприятия.

Энергетический баланс показывает, что более дешевая введенная тепловая энергия дает замещение дорогостоящей электроэнергии. Расходные статьи энергетического баланса изменились, большая часть энергии, уносимой газами, передалась стали, шлаку и воде, что говорит о высокой энергоэффективности предложенной технологии.

Применение комплекса из таких технологических установок и технологий как: жидкий старт, топливно – кислородные горелки, подогрев лома физическим и химическим теплом отходящих газов. Дает массу положительных эффектов которые реализуются лишь при суммарном применении этих технологий. Дожигание отходящих газов непосредственно в печи, дает малый приход тепла непосредственно в шлак и металл из – за низких показателей теплопроводности шлака, и большая часть тепловой энергии уходит в подогреватель лома Consteel тем самым увеличивая суммарный приход тепла в металлический лом. Работа на жидком старте с технологией подогрева отходящими газами наиболее эффективна из за того что загрузка лома осуществляется через герметичную систему Consteel, что положительно сказывается как на производительности агрегата, так и на его тепловых показателях. Расплавление лома с помощью топливно – кислородных горелок тоже с точки непосредственного конвективного теплообмена, процесс не идеальный и отдает в газовую фазу печи от 30 – 50 % тепловой энергии которая уходит в подогреватель Consteel который уже на 50% загружен холодным металлическим ломом, тем самым тепло не усвоенное металлическим ломом в печи уходит на контакт с холодным ломом в подогревателе.

### **3.5 Технико – экономическое обоснование энергосберегающей технологии**

Исходя из информации о цене услуг производителей внедряемых технологических систем примерная стоимость реконструкции дуговой сталеплавильной под проект:

- 300 млн. руб. стоимость системы Consteel;
- 100 млн. руб стоимость топливно – кислородных эркерной и оконной горелок;
- 50 млн. руб стоимость топливно – кислородная фурма;
- 100 млн. руб стоимость реконструкции системы газоочистки под большой объем поступающих газов.

Общая сумма затрат на реконструкцию 100-т дуговой сталеплавильной печи под разработанную энергосберегающую технологию составляет 550 млн. руб. Срок монтажа оборудования будет примерно составлять от 2 -3 месяцев.

На таблице 3.2 и 3.3 приведено сравнение технико – экономических показателей выплавки и доходов от реализации продукции.

Таблица 3.2 – Сравнение производительности стандартной ДСП и энергосберегающей ДСП

Энергосберегающая ДСП	Стандартная ДСП
Доля “болота” 25%	Доля “болота” 15%
70 т масса металла в ковше	80 т масса металла в ковше
48 мин продолжительность плавки	60 мин продолжительность плавки
30 плавов в сутки	24 плавки в сутки
2100 т в сутки	1920 т в сутки
766500 т в год	700800 т в год

Таблица 3.3 – Сравнение дохода от стандартной технологии выплавки стали в ДСП и энергосберегающей

Технологии выплавки	Себестоимость тонны стали, руб	Полная себестоимость тонны проката, руб	Стоимость реализации тонны проката, руб	Годовая прибыль от реализации, руб
Стандартная технология	10000	15000	22000	4905600000
Энергосберегающая технология	8500	13500	22000	6515250000

Разность прибыли от реализации продукции строительного проката (арматуры) при работе по энергосберегающей технологии и стандартной технологии выплавки стали составит 1609650000 руб. за год работы. Срок окупаемости

реконструкции 100-т дуговой сталеплавильной печи составит 3 – 4 месяца, учитывая, срок реконструкции.

### **3.6 Выводы**

1. Разработанная энергосберегающая технология дает прирост к производительности до 20% за счет снижения продолжительности плавки непрерывной подачей металлолома и большей скоростью его расплавления.

2. Экономия электроэнергии с внедрением данной технологии составляет 30%.

3. Общая сумма затрат на реконструкцию 100-т дуговой сталеплавильной печи под разработанную энергосберегающую технологию составляет 550 млн. руб.

4. Срок окупаемости инвестиций внесенных на данный проект составляет 3 – 4 месяца.

## Заключение

1. На основании проведенного анализа энергосберегающих технологий выплавки стали в электродуговой печи определено, что наиболее эффективными являются методы, в которых используется тепловая и химическая энергия отходящих печных газов. К таким методам относятся технология «Consteel», технология дожигания отходящих газов в рабочем пространстве печи, применение горелок с управляемым направлением и длиной факела. Экономия электроэнергии при использовании таких технологий составляет до 30%.

2. Экспериментальными исследованиями термодинамики и кинетики плавления металлического лома в железоуглеродистом расплаве установлены закономерности влияния: температуры жидкого остатка (“болота”), температуры металлического лома, интенсивности перемешивания и времени на скорость растворения лома в расплаве.

3. На основании проведенных аналитических и экспериментальных исследований разработана оптимальная энергосберегающая технология производства электростали в дуговых печах, которая включает в себя подогрев лома теплом отходящих газов, дожигание отходящих газов и использование эркерной, и оконной горелки. Проведенным технико-экономическим обоснованием показано, что затраты на реконструкцию 100-т дуговой электропечи составляют 550 млн.руб.. Срок окупаемости инвестиций составляет 3 – 4 месяца.

## Список использованной литературы

1. Белковский А. Г. Влияние массы жидкого остатка на эксплуатационные показатели ДСП / А. Г. Белковский, Я. Л. Кац // *Металлург.* – 2014. - №11. – С.34 – 40.
2. Годик Л.А., Козырев Н.А., Шабанов П.А. и др. Разработка технологии выплавки стали в электропечах с повышенным расходом жидкого чугуна // *Сталь.* 2009. № 5. С. 30 – 33.
3. Использование угля для нагрева лома в конвертерах / Б. М. Бойченко, В. И. Баптизманский, И. Л. Галигузов и др. // *Известия вузов. Черная металлургия.* – 1986. – №11. – С. 32 - 36.
4. Повышение доли металлолома в шихте конвертеров при использовании твердых углеродсодержащих материалов / Ю. И. Жаворонков, С. Д. Зинченко, К. Н. Демидов и др. // *Сталь.* – 1985. – №8. – С. 27-29.
5. Оборудование и проектирование электрометаллургических цехов [текст] : учебное пособие / И.Д. Рожихина, О.И. Нохрина. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2016. – 317 с.
6. Герасименко И.П. Тепловая работа сталеплавильных агрегатов: учеб.пособие / И.П. Герасименко; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: СибГИУ, 2010. – 252 с.
7. Айзатулов Р. С. Теоретические основы сталеплавильных процессов: учеб.пособие для вузов / Р.С. Айзатулов [и др.]. – М.: Мисис, 2002. – 320 с.
8. Меджиборский М.Я. Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов: учеб.пособие для вузов / М.Я Меджиборский – Киев-Донецк: Вища школа,1979. – 280с.
9. Белковский А.Г. Исследование и разработка параметров технологии выплавки стали с применением ДСП средней вместимости для повышения эффективности производства сортовой заготовки. Дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02. М., 2013. 168 с.

10. Белковский А.Г., Кац Я.Л., Сивак Б.А., Пасечник Н.В. Будущее дуговых сталеплавильных печей – в специализации их конструкции // Черные металлы. 2013. № 3. С. 14–19.
11. Окунева В. В. Эффективность работы дуговых сталеплавильных печей CONSTEEL/ В. В. Окунева, Ю. М. Павлова, А. Н. Макаров// Строительство. Электротехника и химические технологии. – 2019. - №1. – С.47 –57.
12. Евстратов, В.Г. Опыт освоения дуговой сталеплавильной печи фирмы Даниели на Ашинском металлургическом заводе / В.Г. Евстратов, З.Х. Шакиров, Д.В. Васильев, М.Т. Гиндуллин //Труды 12-го конгресса сталеплавыльщиков, г. Выкса, 22-26 октября 2012 г. М: Металлургиздат – 2013, С. 60-61.
13. Федотов С. В. Анализ энергобаланса дуговой печи типа Consteel на ОАО АМЗ / С. В. Федотов, А. В. Тихонов, Е. Б. Агапитов// Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. 100 лет отечественного проектирования металлургических печей труды VIII Международной научно-практической конференции.2016. – С.233 – 237
14. Нугуманов Р.Ф. Перспективные технологии предварительного подогрева лома в полости конвертера / Р.Ф. Нугуманов, Е.В. Протопопов, А.Г. Чернятевич // Известия вузов. Черная металлургия. – 2009. – № 2. – С. 63-66.
15. Макаров А. Н. Закономерности, сопровождающие горение электрической дуги и факела в металлургических печах. Ч. I // Электрометаллургия. 2012. № 7. С. 22–32.
16. Сапрыкин А. А. Интенсификация расплавления стали в дуговых печах с использованием газокислородных горелок / А. А. Сапрыкин, П. Н. Соколов // Сборник материалов международных научно-практических конференций 2018. – С.57 - 63
17. Меркер Э. Э. Исследование и совершенствование режима дожигания отходящих газов при электроплавке железорудного металлизированного сырья в дуговой сталеплавильной печи / Э. Э. Меркер, В. А. Степанов, Л. Н. Крахт, Е.



- В. Ершов // Сталь. 2018. № 10. – С. 71 – 74.
18. Лыков А.А. Теория теплопроводности / А.А. Лыков.– М.:Гостехиздат, 1978. – 424 с.
19. Кожухов А. А. Исследование процесса вспенивания сталеплавильного шлака и его влияние на тепловую работу дуговой сталеплавильной печи / А. А. Кожухов, В. В. Федина, Э. Э. Меркер // *Металлург*. 2012. №3. – С. 42 - 44.
20. Харламов Д. А. Расчет оптимальных характеристик шлака при выплавки стали в дуговой печи / Д. А. Харламов, Э. Э. Меркер // *Молодежь и научно-технический прогресс IX международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых*. 2016. – С. 200 – 202.
21. Миронов Ю. М. Повышение экономической эффективности дуговых сталеплавильных печей с помощью оптимизации их энергопотребления / Ю. М. Миронов, А. Н. Миронова // *Вестник Чувашского университета*. 2018. – С.79 – 92.
22. Кабаков З. К. Расчет баланса теплоты в шахте дуговой сталеплавильной печи Фукса / З. К. Кабаков, С. В. Браткин, М. А. Мащенко, В. И. Серов // *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2015. – С. 8 – 11.
23. Поляруш А. С. Эффективность применения жидкого чугуна в ДСП с целью повышения производительности / А. С. Поляруш, В. И. Заика // В сборнике: *Металлургия XXI столетия глазами молодых сборник докладов V международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов*. 2019. С. – 52 – 53.
24. Меркер Э. Э. Энергосберегающие условия плавления металлизированных окатышей при их подаче через трубчатые электроды в ванну дуговой печи / Э. Э. Меркер, Е. А. Черменев // *Сталь*. 2015. С. – 23 - 31.
25. Чуриков С. Д. Реконструкция дуговой сталеплавильной печи с целью использования теплоты отходящих газов для предварительного нагрева лома / С. Д. Чуриков, Т. Б. Жиргалова // *Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно – технической конференции студентов, аспирантов, ученых*. 2018. С. – 222 –

223.

26. Попов В. В. Оценка эффективности способа производства стали с использованием металлизированного железорудного сырья / В. В. Попов, В. Г. Лисиенко // Сталь. 2014. С. – 379 – 386.

27. Тихонов А. В. Способы интенсификации перехода металлического лома в расплав / А. В. Тихонов, Е. Б. Агапитов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2013. Т. 2. № 71. С. 103-105.

28. Тихонов А. В. Обоснование повышения доли жидкого чугуна в шихте дуговой сталеплавильной печи / А. В. Тихонов, Е. Б. Агапитов // Теория и технология металлургического производства. 2013. № 1 (13). С. 36-37.

29. Тихонов А. В. Организация энергоэффективного плавления лома в сталеплавильных агрегатах / А. В. Тихонов, Е. Б. Агапитов // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. 2014. Т. 2. № 1. С. 301-303.

30. Тихонов А. В. Исследование взаимного влияния предварительного нагрева лома и увеличения доли жидкого чугуна на энергосбережение при производстве стали в дуговых печах / А. В. Тихонов, Е. Б. Агапитов // Энергетики и металлурги настоящему и будущему России: материалы 15-й Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и специалистов / под общ. ред. Е.Б. Агапитова. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова, 2014. С.148-151

31. *Ferri M.B.* Самая крупная в мире установка CONSTEEL снабжает сталью производство полосы на заводе Arvedi // Сталь. 2010. № 11. С. 31–34.

32. *Тулуповский Ю.Н., Зинуров И.Ю.* Инновации для дуговых сталеплавильных печей. Научные основы выбора. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. 347 с.

33. Нугуманов Р. Ф., Протопопов Е. В., Харлашин П. С., Бакст В. Я. Изучение механизма взаимодействия стального лома с железоуглеродистым

- расплавом в диффузионном и тепловом режимах // Изв. вузов. Черная металлургия. 2009. № 8. С. 13 – 16.
34. Меркер Э. Э., Черменев Е. А., Сазонов А. В. Исследование эффективности электроплавки металлизированных окатышей при их непрерывной подаче в ванну дуговой печи // Изв. вузов. Черная металлургия. 2012. № 5. С. 14 – 17.
35. Маркоцци М., Гацзон М. Совершенствование предварительного нагрева и важность работы электродуговых печей большой емкости с жидким остатком // МРТ (русское издание). 2011. № 2. С. 8 – 20.
36. Арджента П., Ферри М. Б. Выплавка электростали с непрерывной загрузкой горячей шихты // Электromеталлургия. 2003. № 5. С. 27 – 33.
37. Смоляренко В. Д., Черняховский Б. П. Гибкий процесс производства электростали по методу Consteel на заводе Ори Мартин // Электromеталлургия. 2004. № 3. С. 40.
38. Рябов А. В., Чуманов И. В., Шишимиров М. В. Современные способы выплавки стали в дуговых печах. — М. : Теплотехник, 2007. — 192 с.
39. Кузьменко А. Г., Фролов Ю. Ф., Поздняков М. А. и др. Дуговые сталеплавильные печи: состояние, проблемы // Электromеталлургия. 2001. № 3. С. 2 – 7.
40. Малиновский В. С., Дубинская Ф. Е. Техничко-экономические и экологические аспекты альтернативных технологий плавки металлов в дуговых печах // Электromеталлургия. 1999. № 3. С. 8 – 16.

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

Кафедра металлургии черных металлов  
(наименование кафедры)

## ГРАФИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

выпускной квалификационной работы

Разработка энергосберегающей технологии выплавки стали в дуговой  
сталеплавильной печи  
(тема)

обучающийся

\_\_\_\_\_

(подпись)

Сафонов С.О.

(фамилия, имя, отчество)

допущен к защите в государственной экзаменационной комиссии «\_\_» \_\_\_\_ 20\_\_ г.

Руководитель

К.Т.Н., доцент  
(уч. степень, звание)

\_\_\_\_\_

(подпись)

Уманский А.А.

(фамилия, имя, отчество)

Заведующий кафедрой

К.Т.Н., доцент  
(уч. степень, звание)

\_\_\_\_\_

(подпись)

Калиногорский А.Н.

(фамилия, имя, отчество)

Директор института

ИМиМ

(название института)

Д.Т.Н., профессор  
(уч. степень, звание)

\_\_\_\_\_

(подпись)

Галевский Г.В.

(фамилия, имя, отчество)

Нормоконтроль

Д.Т.Н., профессор  
(уч. степень, звание)

\_\_\_\_\_

(подпись)

Галевский Г.В.

(фамилия, имя, отчество)

Новокузнецк

2020 г.

Формат	Номер слайда	Обозначение	Наименование листа/слайда	Кол.	Примечание
А 4	1		Тема ВКР	1	
А 4	2		Цель и задачи ВКР	1	
А 4	3		Технология “жидкий старт”	1	
А 4	4		Предварительный подогрев лома отходящими газами в бадьях	1	
А 4	5		Предварительный подогрев лома в шахтных печах с удерживающими пальцами	1	
А 4	6		Предварительный подогрев лома в двухкорпусных ДСП с шахтным подогревателем	1	
А 4	7		Предварительный подогрев лома системой Consteel	1	
А 4	8		Расположение топливно – кислородных горелок	1	
А 4	9		Топливоно – кислородные горелки	1	
А 4	10		Дожигание отходящих газов	1	
А 4	11		Работа на вспененном шлаке	1	
А 4	12		Механизм процесса плавления металлолома	1	
А 4	13		Исследование термодинамики и кинетики растворения лома в железоуглеродистом расплаве	1	

					<b>СибГИУ.2020.22.04.02.М-18213 ВКР</b>						
Изм.	Лист	№ докум	Подп	Дата	<b>Спецификация графической части</b>			Лит	Лист	Листов	
Разраб.	Сафонов С.О.							у	2	12	
Руковод.	Уманский А.А.							<b>СибГИУ гр. МММ-18</b>			
Консульт	Уманский А.А.										
Н.контр	Галевский Г.В.										
Зав. каф.	Калиногорский А.Н.										

Формат	Номер слайда	Обозначение	Наименование листа/слайда	Кол.	Примечание
А 4	14		Исследование термодинамики и кинетики растворения лома в железоуглеродистом расплаве	1	
А 4	15		Разработанная энергосберегающая технология	1	
А 4	16		Энергетический баланс разработанной технологии	1	
А 4	17		Технико – экономическое обоснование энергосберегающей технологии	1	
А 4	18		Спасибо за внимание!	1	

					<b>СибГИУ.2020.22.04.02.М-18213 ВКР</b>					
Изм.	Лист	№ докум	Подп	Дата	<b>Спецификация графической части</b>			Лит	Лист	Листов
Разраб.	Сафонов С.О.							у	3	21
Руковод.	Уманский А.А.									
Консульт	Уманский А.А.									
Н.контр	Галевский Г.В.									
Зав. каф.	Калиногорский А.Н.				СибГИУ гр. МММ-18					

# Разработка энергосберегающей ТЕХНОЛОГИИ ТЕХНОЛОГИИ выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи

**Выполнил:**

обучающийся гр.

МММ-18  
аббревиатура группы

С.О. Сафонов

инициалы фамилия

**Проверил:**

к.т.н., доцент

уч. степень, звание

А.А. Уманский

инициалы фамилия

					СибГИУ.2020.22.04.02.М-18213 ВКР			
Изм.	Лист	№ докум	Подп	Дата	Тема ВКР	Лит	Лист	Листов
Разраб.		Сафонов С.О.				у	4	21
Руковод.		Уманский А.А.						
Консульт		Уманский А.А.						
Н.контр		Галевский Г.В.						
Зав. каф.		Калиногорский А.Н.			СибГИУ гр. МММ-18			

## Цель и задачи выпускной квалификационной работы

**Цель ВКР** – Теоретическое обоснование оптимальной энергосберегающей технологии выплавки стали в дуговой электропечи.

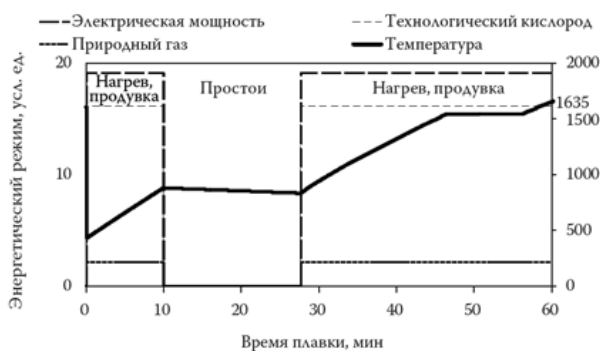
### **Задачи ВКР:**

- Анализ современных технологических решений по снижению расхода энергоресурсов при выплавке стали в электропечах;
- Проведение экспериментальных исследования термодинамики и кинетики растворения металлического лома в железоуглеродистом расплаве;
- Обоснование и выбор оптимальной технологии производства стали в дуговой электропечи, обеспечивающей повышение энергоэффективности производства.

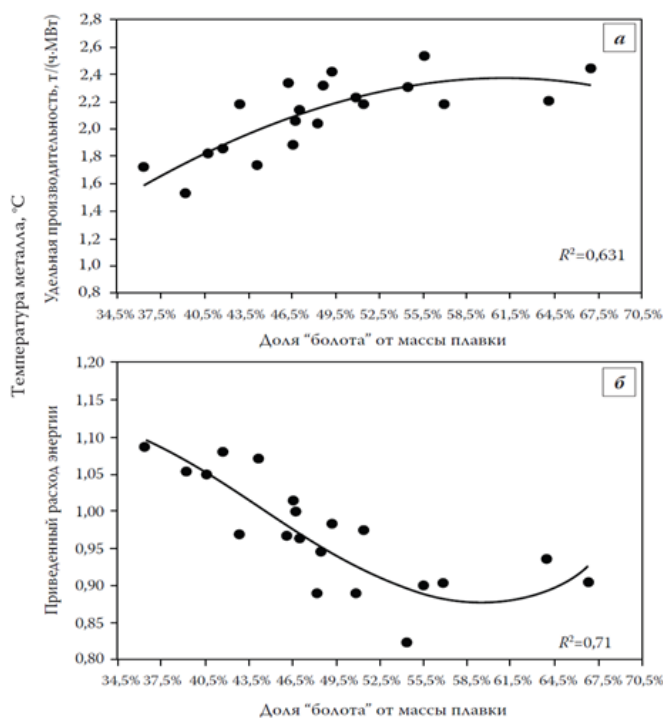
					СибГИУ.2020.22.04.02.М-18213 ВКР				
Изм.	Лист	№ докум	Подп	Дата	Цель и задачи ВКР	Лит		Лист	Листов
Разраб.		Сафонов С.О.					у	5	21
Руковод.		Уманский А.А.				СибГИУ гр. МММ-18			
Консульт		Уманский А.А.							
Н.контр		Галевский Г.В.							
Зав. каф.		Калиногорский А.Н.							



# Технология “жидкий старт” (“болото”)



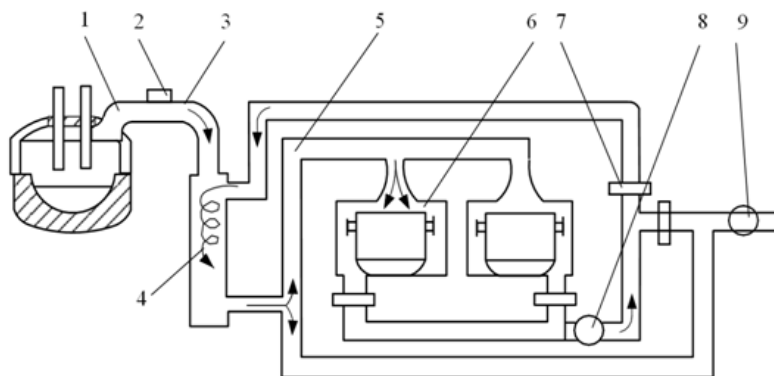
Энергетический режим и расчетное изменение температуры металла при моделировании плавки в ДСП с верхней загрузкой и долей болота 0,2 от номинальной вместимости печи



Влияние массы болота на удельную производительность (а) и приведенный расход энергии (б). Уная производительность – часовая производительность, отнесенная к 1 МВт активной мощности трансформатора; приведенный расход энергии 1,00 соответствует 365 кВт·ч/т электроэнергии и 36 м³/т кислорода (на годную заготовку)

					СибГИУ.2020.22.04.02.М-18213 ВКР			
Изм.	Лист	№ докум	Подп	Дата				
Разраб.		Сафонов С.О.			Технология “жидкий старт” (“болото”)	Лит	Лист	Листов
Руковод.		Уманский А.А.				у	6	21
Консулт		Уманский А.А.				СибГИУ гр. МММ-18		
Н.контр		Галевский Г.В.						
Зав. каф.		Калиногорский А.Н.						

## Предварительный подогрев лома отходящими газами в бадьях

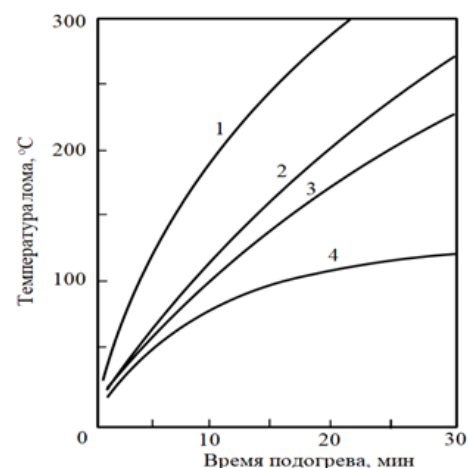


1 – сводовый патрубок, 2 – подвижная муфта, 3 – стационарный газоход, 4 – камера дожигания, 5 – газоход, 6 – камера подогрева, 7 – система клапанов, 8 – дымосос

Принципиальная схема двухкамерной установки с рециркуляцией газа

Величины полезно вносимого тепла при различных температурах нагрева лома

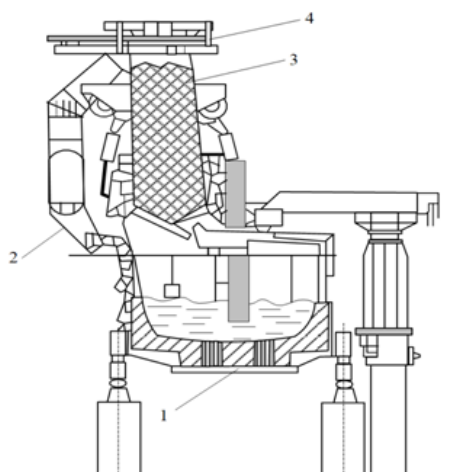
Средняя температура, °С	100	200	300	400	500	600
Полезное вносимое тепло, кВт ч/т	13,0	26,6	47,9	57,3	74,3	94,7



1 – стружка; 2 – подготовленный лом  
3 – тяжеловесный лом; 4 –  
пакетированный лом  
Продолжительность подогрева  
различных типов лома

					СибГИУ.2020.22.04.02.М-18213 ВКР			
Изм.	Лист	№ докум	Подп	Дата				
Разраб.		Сафонов С.О.			Предварительный подогрев лома отходящими газами в бадьях	Лит	Лист	Листов
Руковод.		Уманский А.А.				у	7	21
Консульт		Уманский А.А.				СибГИУ гр. МММ- 18		
Н.контр		Галевский Г.В.						
Зав. каф.		Калиногорский А.Н.						

# Предварительный подогрев лома в шахтных печах с удерживающими пальцами



1 – ДСП; 2 – удерживающие пальцы;  
3 – приемная воронка; 4 – заслонка шихты

Схема ДСП с шахтным подогревателем с удерживающими пальцами

Показатели работы 150-т обычной печи (ДСП), шахтной дуговой печи (ШП) и шахтной дуговой печи с удерживающими пальцами, оборудованной системой FAST (ШПФ)

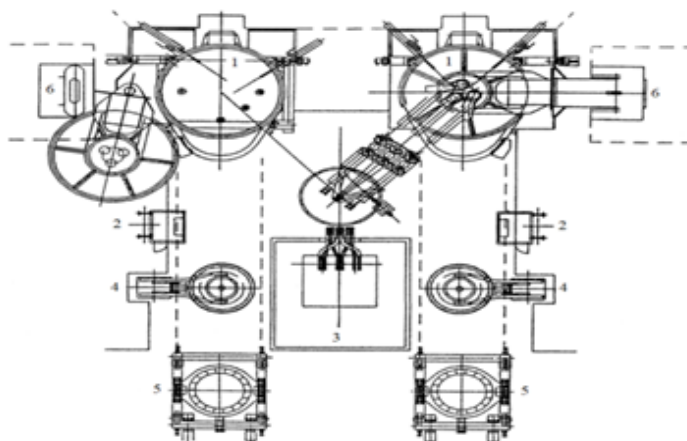
Показатели работы	ДСП	ШП	ШПФ
Температура стали при выпуске, °С	1620	1620	1600
Токовое время плавки, мин	38	26,5	25,8
Бестоковое время плавки, мин	12	11	8,0
Продолжительность плавки, мин	50	37	33,5
Производительность печи, т/ч	180,5	239,8	267,9
Количество плавов в сутки	28,8	38,4	42,9
Выделение CO <sub>2</sub> , кг/т	667	440	430
Издержки, долл./т	18,79	14,05	11,52
Расход электроэнергии, кВт ч/т	384	270	264
Расход электродов, кг/т	1,6	1,1	1,0
Расход кислорода, нм <sup>3</sup> /т:			
– фурмы	30	28	28
– горелки	5,4	9,8	9,6
Расход газа (горелки), нм <sup>3</sup> /т	2,4	4,4	4,4
Расход угля в завалку, кг/т	12	12	12
Расход инжестируемого угля, кг/т	7,3	4,1	3,8
Расход извести, кг/т	42	42	42

					СибГИУ.2020.22.04.02.М-18213 ВКР			
Изм.	Лист	№ докум	Подп	Дата				
Разраб.		Сафонов С.О.			Предварительный подогрев лома в шахтных печах с удерживающими пальцами	Лит	Лист	Листов
Руковод.		Уманский А.А.				у	8	21
Консульт		Уманский А.А.				СибГИУ гр. МММ-18		
Н.контр		Галевский Г.В.						
Зав. каф.		Калиногорский А.Н.						

## Предварительный подогрев лома в двухкорпусных ДСП с шахтным подогревателем

Сравнительные показатели работы одно- (ОШ) и двухкорпусных (ДШ) ДСП вместимостью 90 т с шахтным подогревателем лома

Показатели	ОШ	ДШ
Расход электроэнергии, кВт-ч/т	330	340-360
Расход электродов, кг/т	1,8	1,6
Расход кислорода, нм <sup>3</sup> /т	30	25-30
Расход газа, нм <sup>3</sup> /т	7	6-8
Углерод завалки, кг/т	15	8-10
Углерод дутья, кг/т		3-8
Время под током, мин	33-40	35-37
Общая длительность цикла плавки, мин	51-60	38-43
Производительность, т/ч	96-112	130-153
Годовая производительность, т/год	700-800	1030-1100



1 – корпус ванны ДСП (А, Б); 2 – пульт управления выпуском стали;  
3 – трансформатор; 4 – подогреватель сталевазливочного ковша;  
5 – сталеваз; 6 – система газоотвода с предварительным подогревом  
Схема расположения двухкорпусной ДСП

					СибГИУ.2020.22.04.02.М-18213 ВКР			
Изм.	Лист	№ докум	Подп	Дата	Предварительный подогрев лома в двухкорпусных ДСП с шахтным подогревателем	Лит	Лист	Листов
Разраб.		Сафонов С.О.				у	9	21
Руковод.		Уманский А.А.				СибГИУ гр. МММ-18		
Консульт		Уманский А.А.						
Н.контр		Галевский Г.В.						
Зав. каф.		Калиногорский А.Н.						

# Предварительный подогрев лома системой Consteel

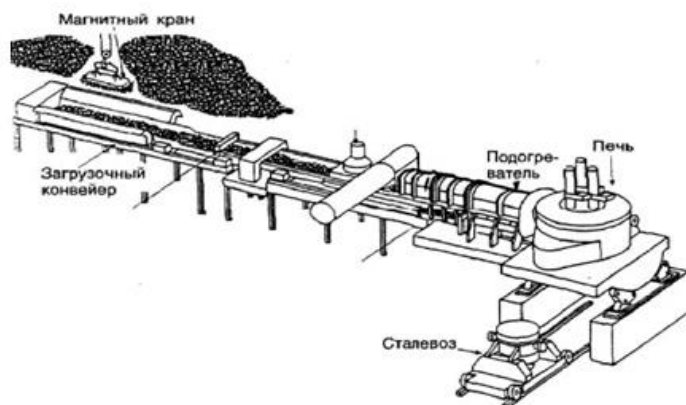
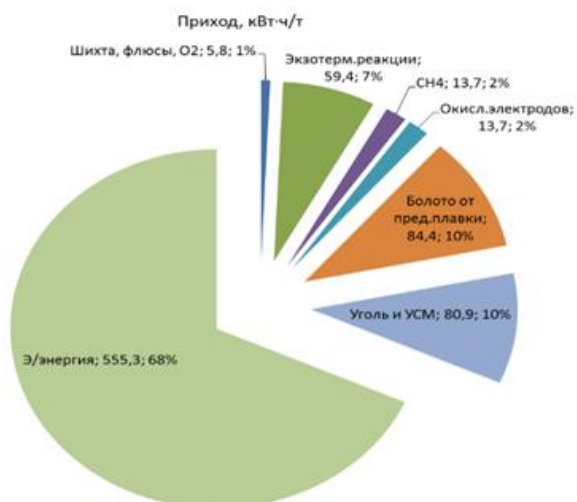
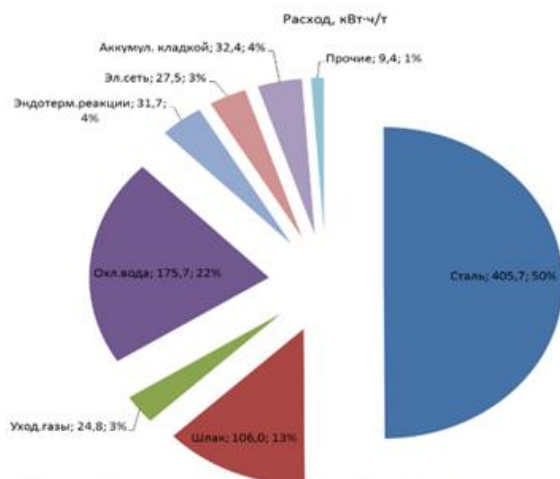


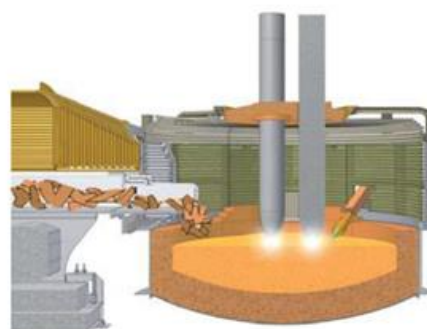
Схема системы Consteel



Приходная часть энергетического баланса



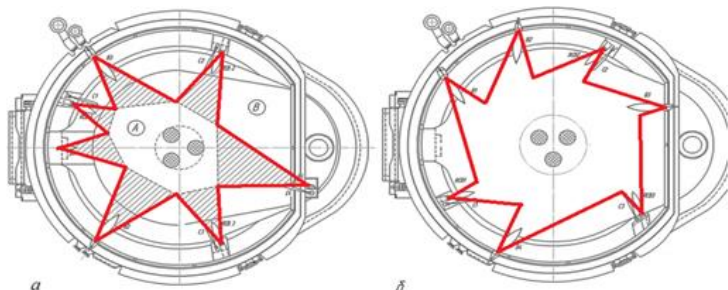
Расходная часть энергетического баланса



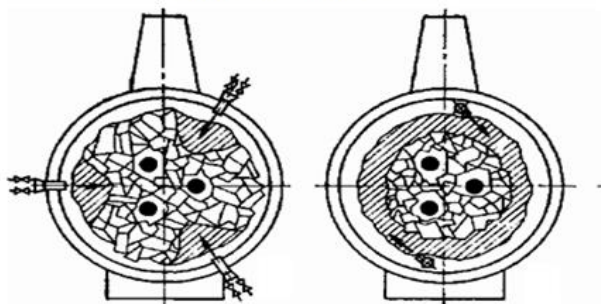
Загрузка и расплавление предварительно нагретого лома

					СибГИУ.2020.22.04.02.М-18213 ВКР			
Изм.	Лист	№ докум	Подп	Дата				
Разраб.		Сафонов С.О.			Предварительный подогрев лома системой Constell	Лит	Лист	Листов
Руковод.		Уманский А.А.				у	10	21
Консулт		Уманский А.А.				СибГИУ гр. МММ-18		
Н.контр		Галевский Г.В.						
Зав. каф.		Калиногорский А.Н.						

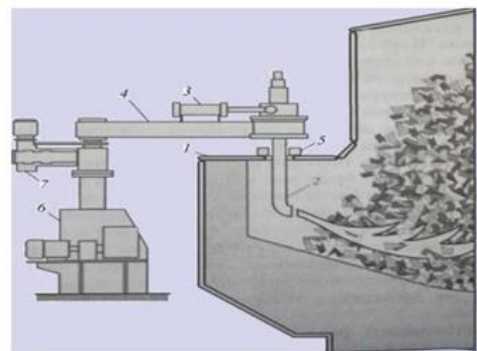
# Расположение топливно – кислородных горелок



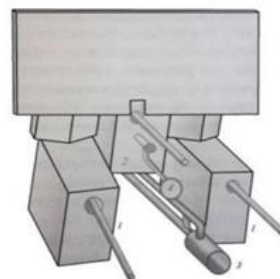
RCB1...RCB3 – комбинированные горелочные фурмы; B1...B4 – стеновые газокислородные горелки; C1...C4 – фурмы для подачи углеродсодержащих материалов. а – базовое предложение фирмы Danieli; б – эффективное расположение  
 Схема расположения ТСУ



а – стеновые ТКГ, б – поворотные ТКГ  
 Сводная горелка



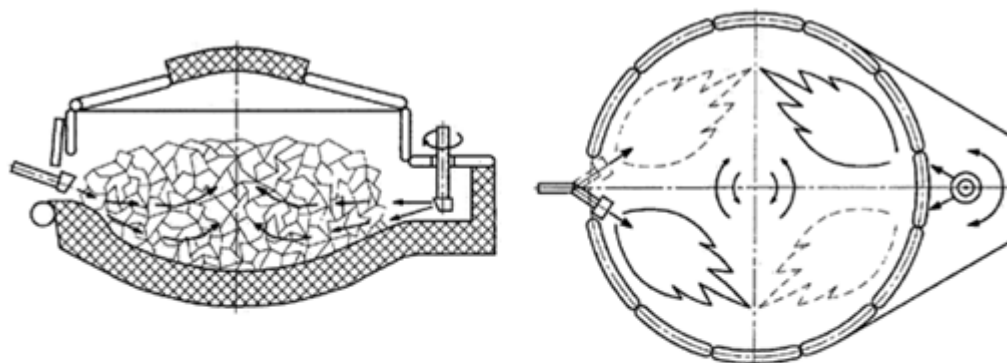
1 – водоохлаждаемая крышка; 2 – горелка; 3 – цилиндр; 4 – кронштейн; 5 – уплотнитель; 6 – механизм подъема установки; 7 – механизм отвода горелки  
 Установка HPR-горелки в дополнительном эркере



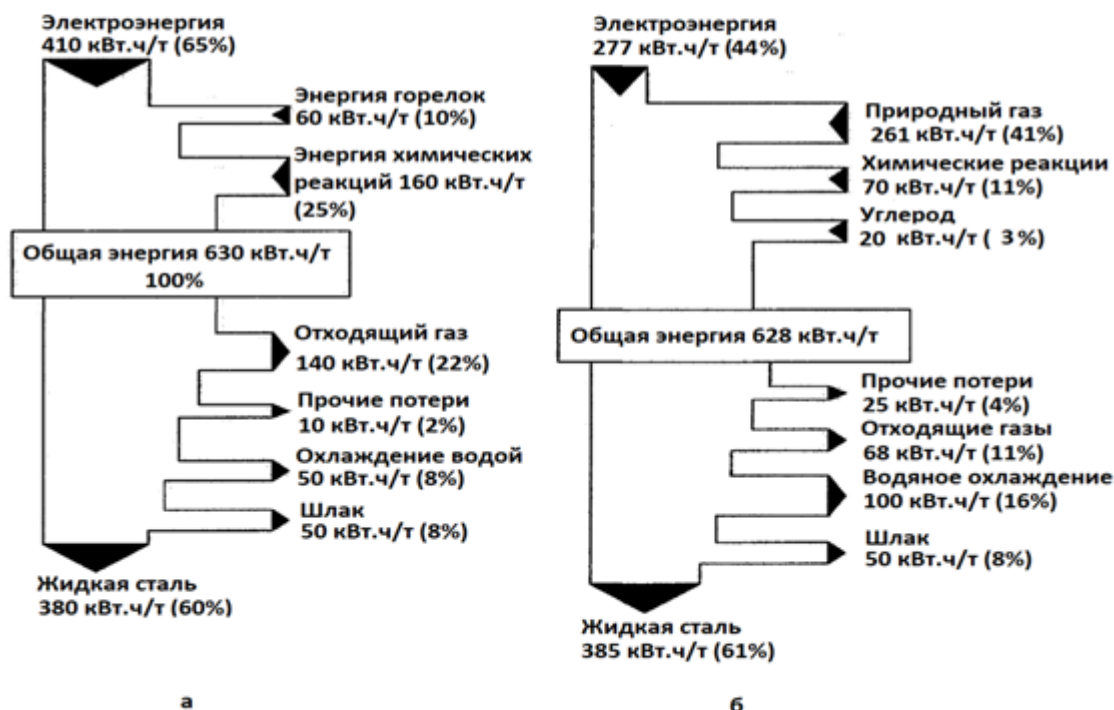
1 – боковые боксы; 2 – средний бокс; 3 – головка горелки; 4 – щиток HPR-горелки на манипуляторе BSE

					СибГИУ.2020.22.04.02.М-18213 ВКР			
Изм.	Лист	№ докум	Подп	Дата				
Разраб.		Сафонов С.О.			Расположение топливно – кислородных горелок	Лит	Лист	Листов
Руковод.		Уманский А.А.				у	11	21
Консулт		Уманский А.А.				СибГИУ гр. МММ-18		
Н.контр		Галевский Г.В.						
Зав. каф.		Калиногорский А.Н.						

# Топливоно – кислородные горелки



Расположение ТСУ в рабочем окне и эркере

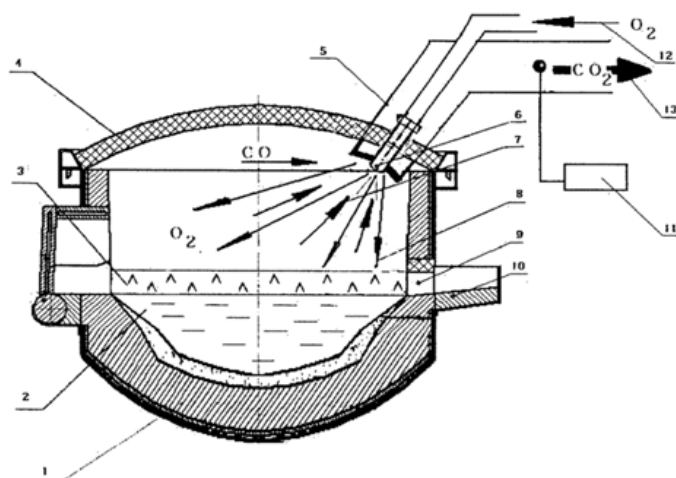


а – тепловой баланс без применения высокомошных поворотных горелок, б – тепловой баланс с применением высокомошных поворотных горелок

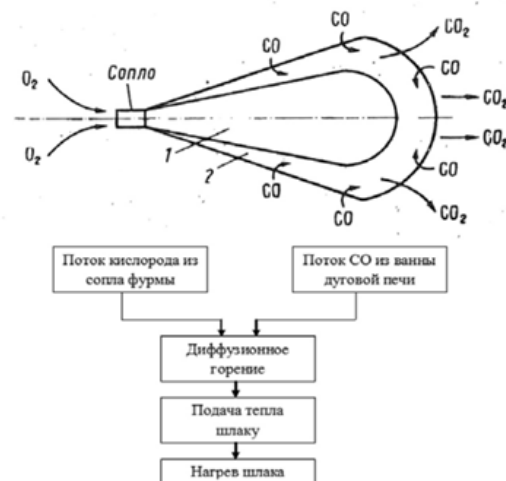
Тепловые балансы плавки в ДСП

					СибГИУ.2020.22.04.02.М-18213 ВКР			
Изм.	Лист	№ докум	Подп	Дата				
Разраб.		Сафонов С.О.			Топливоно – кислородные горелки	Лит	Лист	Листов
Руковод.		Уманский А.А.				у	12	21
Консулт		Уманский А.А.				СибГИУ гр. МММ-		
Н.контр		Галевский Г.В.				18		
Зав. каф.		Калиногорский А.Н.						

## Дожи́гание отходящих газов



- 1 – ДСП, 2 – металлическая ванна, 3 – шлак,  
 4 – свод ДСП, 5 – патрубок, 6 – фурма, 7 –  
 отходящие газы,  
 8 – завихрённая струя кислорода, 9 – летка, 10  
 – выпускной желоб, 11 – газоанализатор, 12 –  
 поток кислорода, 13 – конечные газы  
 Схема ДСП с фурмой для дожигания газов

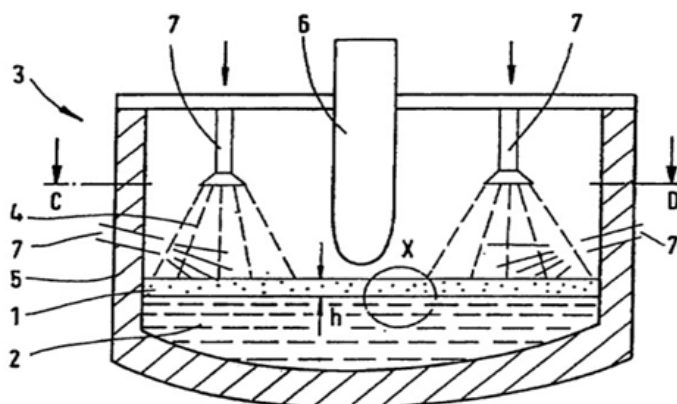


Принципиальная схема механизма дожигания CO

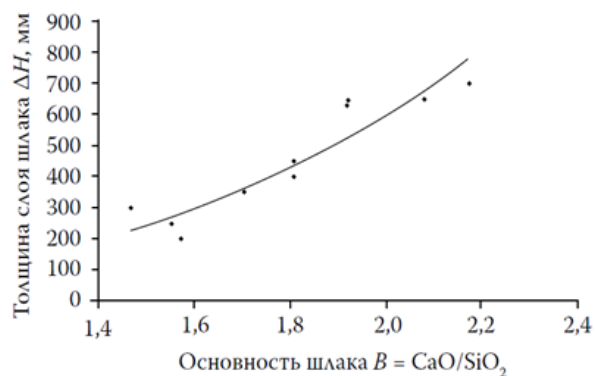
					СибГИУ.2020.22.04.02.М-18213 ВКР			
Изм.	Лист	№ докум	Подп	Дата				
Разраб.		Сафонов С.О.			Дожи́гание отходящих газов	Лит	Лист	Листов
Руковод.		Уманский А.А.				у	13	21
Консуьлт		Уманский А.А.				СибГИУ гр. МММ-18		
Н.контр		Галевский Г.В.						
Зав. каф.		Калиногорский А.Н.						



## Работа на вспененном шлаке



1 – вспененный шлак, 2 – жидкий металл, 3 – ДСП, 4 – вспенивающая смесь, 5 – футеровка, 6 – электроды, 7 – фурмы для подачи смеси  
Схема подачи углеродистого материала (восстановителя) на поверхность шлака



Характер изменения толщины вспененного шлака в зависимости от основности

					СибГИУ.2020.22.04.02.М-18213 ВКР			
Изм.	Лист	№ докум	Подп	Дата				
Разраб.		Сафонов С.О.			Работа на вспененном шлаке	Лит	Лист	Листов
Руковод.		Уманский А.А.				у	14	21
Консульт		Уманский А.А.				СибГИУ гр. МММ-18		
Н.контр		Галевский Г.В.						
Зав. каф.		Калиногорский А.Н.						

# Механизм процесса плавления металлолома

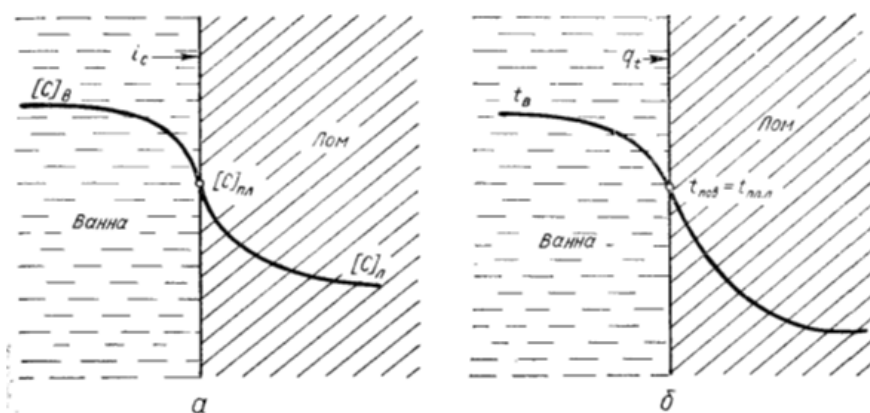
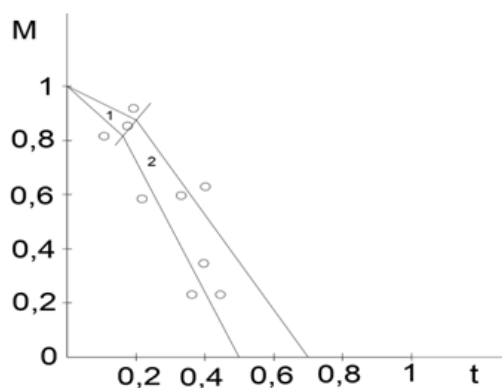


Схема диффузионного растворения (а) и теплового плавления (б) лома в металлической ванне



Динамика плавления тяжеловесного лома в ДСП

Время расплавление различных видов лома

Вид лома	Время плавления от времени плавки
Легковесный (сечение > 0,04·0,04м)	15%
Пресс-пакеты или куски (0,08·0,08м)	40%
Тяжеловесный (0,3·0,03м)	70%

					СибГИУ.2020.22.04.02.М-18213 ВКР			
Изм.	Лист	№ докум	Подп	Дата				
Разраб.		Сафонов С.О.			Механизм процесса плавление металлолома	Лит	Лист	Листов
Руковод.		Уманский А.А.				у	15	21
Консульт		Уманский А.А.				СибГИУ гр. МММ-18		
Н.контр		Галевский Г.В.						
Зав. каф.		Калиногорский А.Н.						

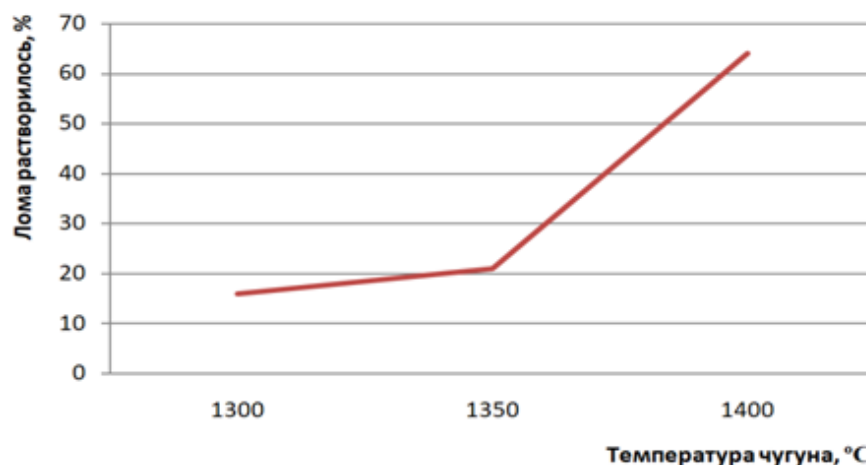
# Исследование термодинамики и кинетики растворения лома в железоуглеродистом расплаве

Химический состав применяемого передельного чугуна

Элемент	C	Si	Mn	S	P
Содержание, %	4,3	0,6	0,7	0,032	0,83

Химический состав стали марки А11

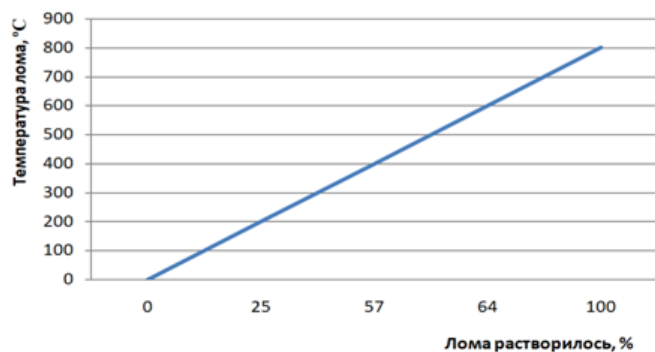
Элемент	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Cu
Содержание, %	0,07-0,15	до 0,01	0,8-1,2	0,15-0,25	0,06-0,012	до 0,25	до 0,25	до 0,25



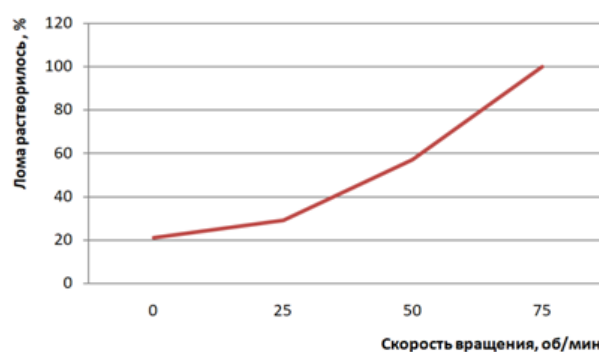
Влияние температуры болота на растворимость лома

					СибГИУ.2020.22.04.02.М-18213 ВКР			
Изм.	Лист	№ докум	Подп	Дата				
Разраб.		Сафонов С.О.			Исследование термодинамики и кинетики растворения лома в железоуглеродистом расплаве	Лит	Лист	Листов
Руковод.		Уманский А.А.				у	16	21
Консульт		Уманский А.А.				СибГИУ гр. МММ-18		
Н.контр		Галевский Г.В.						
Зав. каф.		Калиногорский А.Н.						

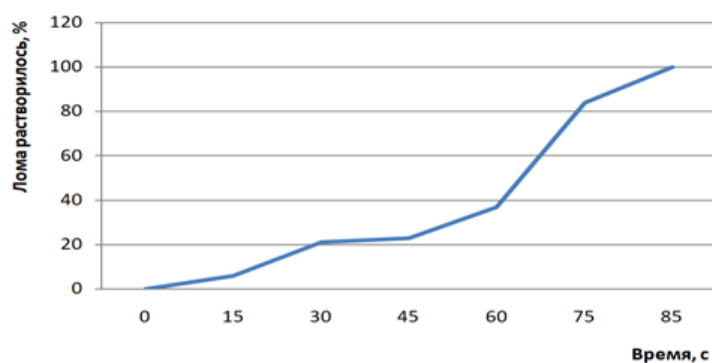
# Исследование термодинамики и кинетики растворения лома в железоуглеродистом расплаве



Влияние температуры лома на его растворимость в болоте



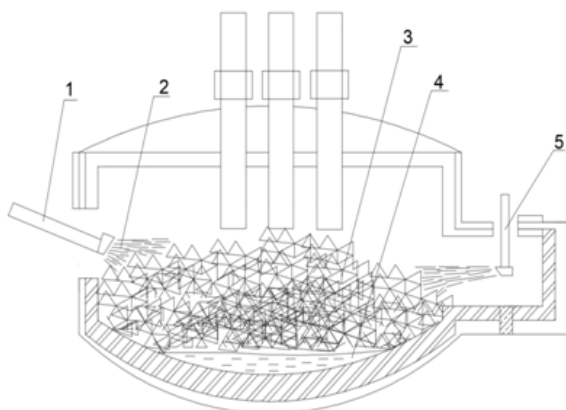
Влияние скорости вращения лома на его растворимость в болоте



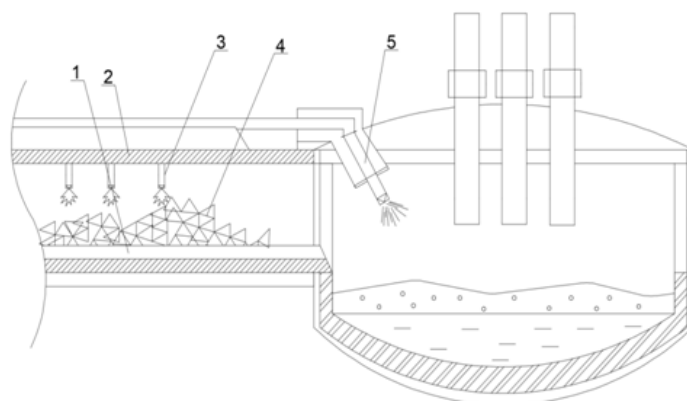
Кинетика диффузионного растворения лома в болоте

					СибГИУ.2020.22.04.02.М-18213 ВКР			
Изм.	Лист	№ докум	Подп	Дата				
Разраб.		Сафонов С.О.			Исследование термодинамики и кинетики растворения лома в железоуглеродистом расплаве	Лит	Лист	Листов
Руковод.		Уманский А.А.				у	17	21
Консулт		Уманский А.А.				СибГИУ гр. МММ-18		
Н.контр		Галевский Г.В.						
Зав. каф.		Калиногорский А.Н.						

## Разработанная энергосберегающая ТЕХНОЛОГИЯ



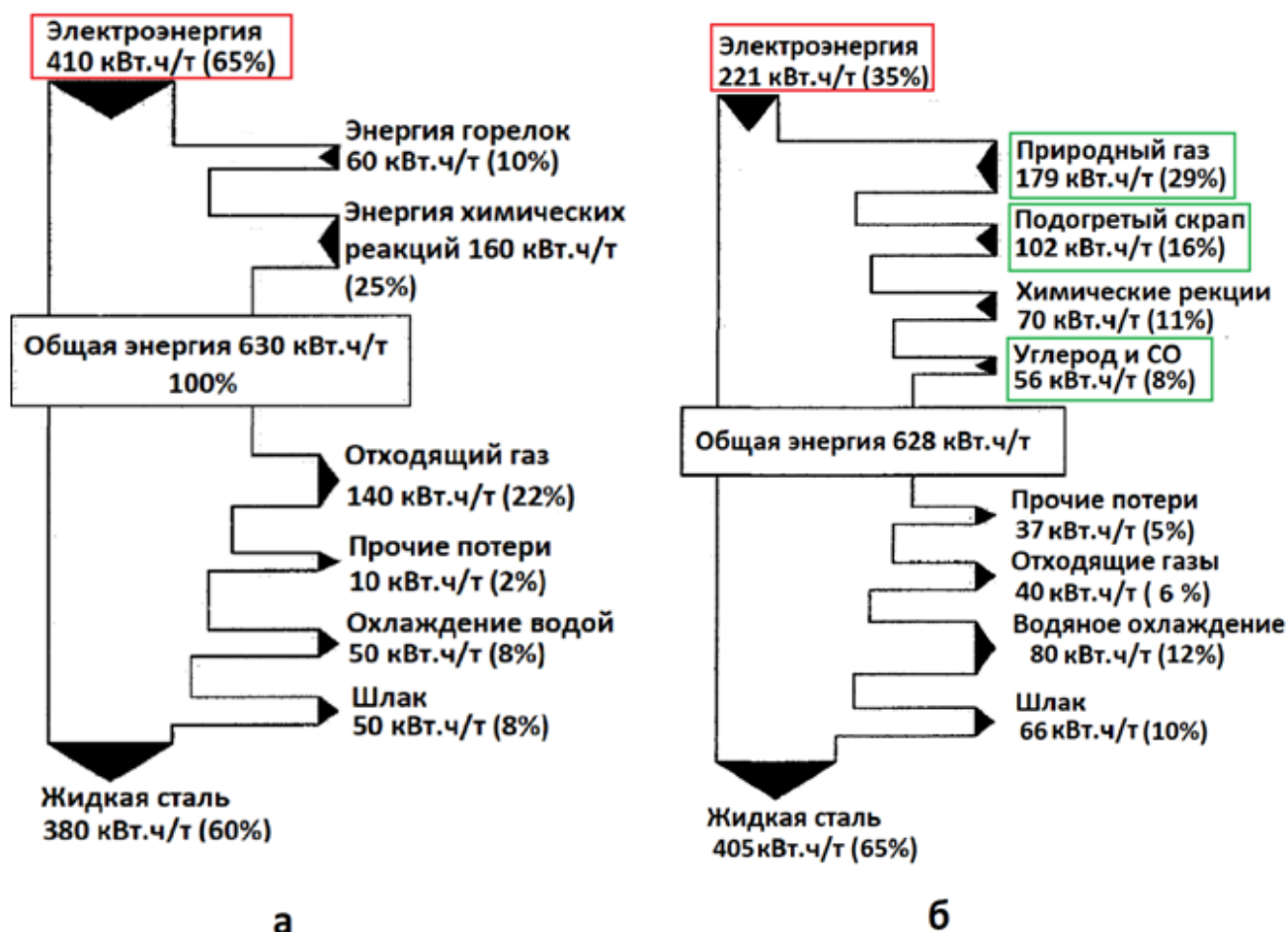
1 – оконная поворотная фурма, 2 – топливно – кислородная фурма, 3 – металлический лом, 4 – жидкое болото, 5 – эркерная поворотная горелка  
Схема работы эркерной и оконной горелки в период расплавления лома



1 – водоохлаждаемый конвейер, 2 – футеровка, 3 – топливно – кислородная горелка, 4 – металлический лом, 5 – топливно – кислородная фурма  
Схема работы печи Consteel и дожигающей СО фурмы в окислительный период

					СибГИУ.2020.22.04.02.М-18213 ВКР			
Изм.	Лист	№ докум	Подп	Дата				
Разраб.		Сафонов С.О.			Разработанная энергосберегающая технология	Лит	Лист	Листов
Руковод.		Уманский А.А.				у	18	21
Консульт		Уманский А.А.				СибГИУ гр. МММ-18		
Н.контр		Галевский Г.В.						
Зав. каф.		Калиногорский А.Н.						

## Энергетический баланс разработанной технологии



а – стандартная технология, б – энергосберегающая технология  
Сравнение энергетических балансов

					СибГИУ.2020.22.04.02.М-18213 ВКР			
Изм.	Лист	№ докум	Подп	Дата	Энергетический баланс разработанной технологии	Лит	Лист	Листов
Разраб.		Сафонов С.О.				у	19	21
Руковод.		Уманский А.А.				СибГИУ гр. МММ-18		
Консульт		Уманский А.А.						
Н.контр		Галевский Г.В.						
Зав. каф.		Калиногорский А.Н.						

## Технико – экономическое обоснование энергосберегающей технологии

Сравнение производительности стандартной ДСП и энергосберегающей ДСП

Энергосберегающая ДСП	Стандартная ДСП
Доля “болота” 25%	Доля “болота” 15%
70 т масса металла в ковше	80 т масса металла в ковше
48 мин продолжительность плавки	60 мин продолжительность плавки
30 шлаков в сутки	24 шлаки в сутки
2100 т в сутки	1920 т в сутки
766500 т в год	700800 т в год

Сравнение дохода от стандартной технологии выплавки стали в ДСП и энергосберегающей

Технологии выплавки	Себестоимость тонны стали, руб	Полная себестоимость тонны проката, руб	Стоимость реализации тонны проката, руб	Годовая прибыль от реализации, руб
Стандартная технология	10000	15000	22000	4905600000
Энергосберега ющая технология	8500	13500	22000	6515250000

Изм.	Лист	№ докум	Подп	Дата	СибГИУ.2020.22.04.02.М-18213 ВКР			
Разраб.	Сафонов С.О.				Технико – экономическое обоснование энергосберегающей технологии	Лит	Лист	Листов
Руковод.	Уманский А.А.					у	20	21
Консульт	Уманский А.А.					СибГИУ гр. МММ- 18		
Н.контр	Галевский Г.В.							
Зав. каф.	Калиногорский А.Н.							

# Спасибо за внимание!

					СибГИУ.2020.22.04.02.М-18213 ВКР				
Изм.	Лист	№ докум	Подп	Дата					
Разраб.		Сафонов С.О.			Спасибо за внимание!	Лит	Лист	Листов	
Руковод.		Уманский А.А.				у	21	21	
Консульт		Уманский А.А.				СибГИУ гр. МММ- 18			
Н.контр		Галевский Г.В.							
Зав. каф.		Калиногорский А.Н.							



