

*На правах рукописи*

**Шкирмонтов Александр Прокопьевич**

**РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ  
ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЫПЛАВКИ  
ФЕРРОСПЛАВОВ УГЛЕРОДОТЕРМИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ  
С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ**

Специальность 2.6.2 (05.16.02) – Металлургия черных,  
цветных и редких металлов

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Челябинск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)») на кафедре пирометаллургических процессов.

**Научный консультант:**

**Рошин Василий Ефимович**, доктор технических наук, профессор.

**Официальные оппоненты:**

**Картавцев Сергей Владимирович**, доктор технических наук, профессор. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова" (ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова»), профессор кафедры теплотехнических и энергетических систем, г. Магнитогорск.

**Сивцов Андрей Владиславович**, доктор технических наук. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии Уральского Отделения Российской академии наук (ФГБУН ИМет УрО РАН), ведущий научный сотрудник, г. Екатеринбург.

**Шешуков Олег Юрьевич**, доктор технических наук, профессор. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»), директор Института новых материалов и технологий, заведующий кафедрой металлургии железа и сплавов, г. Екатеринбург.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» (ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»), г. Чебоксары.

Защита диссертации состоится 24 ноября 2021 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.437.01 (Д212.298.01) при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ЮУрГУ, главный корпус, ауд. 1001.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ЮУрГУ, ученый совет.

Тел. (351) 267-91-23, факс (351) 267-92-28, e-mail: [aps-panor@yandex.ru](mailto:aps-panor@yandex.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» и на сайте:

<https://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229801/shkirmontov-aleksandr-prokopevich>

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного  
совета, доцент, к.т.н.

Шабурова Наталия Александровна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Основным потребителем ферросплавов является сталеплавильное производство. Тенденции в повышении объёмов производства высококачественной стали и увеличение доли легированной стали определяют возрастающую потребность в ферросплавах. Основной объём ферросплавов получают в электропечах на восстановлении ведущего элемента сплава из оксидов. В процессе используются углеродистые восстановители, рудные материалы, флюсующие и металлодобавки.

Особенности выплавки ферросплавов заключаются в том, что электропечь работает в смешанном режиме выделения тепла, как в режиме сопротивления, так и в режиме дуги, что усложняет процесс, поскольку электрический режим и технология взаимосвязаны и определяются составом шихты, её удельным электросопротивлением и конструкцией агрегата. Кроме того, с укрупнением печей наблюдается увеличивающийся разрыв между мощностью трансформаторов и активной мощностью в ванне печи для технологического процесса, что не позволяет обеспечить высокие технико-экономические показатели и ограничивает производительность.

Процессы получения ферросплавов в электропечах относятся к разряду энергоёмких. Удельный расход электроэнергии составляет от 3 до 20 МВт·ч/т при производстве ферросплавов и кремния, что в 7 – 20 раз больше, чем при выплавке 1 т стали в дуговой печи. Доля затрат на электроэнергию в структуре себестоимости ферросплавов высока и существенно возрастает. К значительному ухудшению показателей производства также приводит снижение качества рудных материалов и углеродистых восстановителей. В этих условиях актуальным является повышение эффективности производства ферросплавов путём разработки и совершенствования энерготехнологических параметров выплавки в электропечах, что является актуальной научной и хозяйственной задачей.

**Степень разработанности темы исследования.** Проблемой улучшения технологических и энергетических параметров ферросплавных электропечей занимались многие исследователи и разработчики: Andreeae F., Durrer R., Volkert G., Kelly W.H., Morkramer M., Romani A., Degel R., Barcza N.A., McRae L.B., Ichihara K., Хитрик С.И., Жердев И.Т., Гасик М.И., а также Микулинский А.С., Елютин В. П., Еднерал Ф.П., Щедровицкий Я.С., Лякишев Н.П., Рысс М.А., Жучков В.И., Воробьёв В.П., Рябчиков И.В., Миронов Ю.М., Мизин В.Г., Струнский Б.М., Дащевский В.Я., Чернобровин В.П. и другие.

Для повышения энерготехнологических показателей работы ферросплавных печей были предложены ряд технических решений: технологии выплавки с различными углеродистыми восстановителями; конструкций электропечей с вдуванием газов через полые электроды; разряжение под сводом печи; использование печей с пониженной частотой тока; применение печей постоянного тока с открытой и закрытой дугой, а также плазменных печей и другие разработки.

**Цель работы** – развитие теоретических основ совершенствования энерготехнологических параметров выплавки ферросплавов углеродотермическим процессом для улучшения показателей работы электропечей, путём применения комплексного подхода,

включающего теоретическое исследование и разработку более эффективных параметров выплавки.

### **Задачи исследования**

1. Проанализировать энерготехнологические параметры выплавки ферросплавов с использованием данных отечественных и зарубежных электропечей.

2. Исследовать параметры выплавки ферросплавов для выявления закономерностей и выяснения причин ухудшения работы электропечей при повышении их мощности.

3. На основании массива технологических, электрических, теплотехнических и конструктивных параметров печи выявить группы основных показателей, совокупность которых характеризует в комплексе процесс выплавки ферросплавов в электропечном агрегате.

4. Исследовать составляющие величины комплексного параметра выплавки ферросплавов в электропечах.

5. Провести анализ работы электропечей на основании комплексного параметра для оценки эффективности выплавки ферросплавов.

6. Исследовать на основе теории подобия, в применении к ферросплавным печам, технологию выплавки кремнистых, хромистых и марганцевых сплавов по величине подэлектродного промежутка, распада электродов, в том числе с применением методов моделирования, для выявления факторов, позволяющих улучшить энерготехнологические параметры при увеличении мощности печей.

7. Подтвердить результаты моделирования выплавкой ферросплавов на различных энерготехнологических схемах в опытных крупномасштабных электропечах, в полупромышленном и промышленном вариантах для улучшения параметров процесса.

8. Провести оценку различных технических решений в области выплавки ферросплавов с позиции комплексного энерготехнологического параметра для выбора наиболее перспективных направлений в улучшении показателей электропечей и выдать практические рекомендации.

**Достоверность** теоретических положений работы подтверждается математическими выводами, традиционным способом электролитического моделирования электропечей, анализом большого количества практических данных выплавки ферросплавов в промышленных печах, а также результатами разработанных технологических схем выплавки в опытных крупномасштабных электропечах, в полупромышленном и промышленном вариантах.

**Методология и методы исследования.** Применен системный подход к изучению сложного динамического объекта, представляющего собой систему: электропечь, работающую в смешанном режиме сопротивления и электрической дуги, с одной стороны, и углеродотермический, рудовосстановительный процесс выплавки ферросплавов, с другой стороны. Для исследования были использованы методы теории подобия, способы электролитического моделирования ферросплавных печей, схемы замещения рабочего пространства печи и методы теории электрических цепей, теоретические основы техно-

логии выплавки ферросплавов шлаковым и бесшлаковым углеродотермическим процессом, методология выплавки с закрытой дугой в электропечах и прикладные методы статистического анализа.

### **Научная новизна**

**1. На основе теоретических положений и практических исследований получена новая информация о процессе выплавки ферросплавов в электропечах.** Это позволяет при рассмотрении в комплексе технологических, электрических и теплотехнических параметров выплавки выявить наиболее существенные закономерности для улучшения энерготехнологических показателей работы ферросплавных электропечей.

**2. Впервые в электрометаллургии ферросплавов введено новое понятие – энерготехнологический критерий работы ферросплавной электропечи.** Полученная безразмерная величина определяется на основе комплекса технологических, электрических и теплотехнических параметров выплавки ферросплавов и однозначно характеризует эффективность работы электропечи, а также может быть использована для совершенствования технологии выплавки и конструкции печных агрегатов.

В отличие от такого параметра, как общий КПД электропечи, который состоит из электрического и теплового КПД, предложенный энерготехнологический критерий ферросплавной печи дополнительно включает коэффициент мощности печи, степень извлечения ведущего элемента в сплав (кремния, марганца, хрома) и коэффициент загрузки печного трансформатора. Это позволяет более полно и комплексно оценить работу ферросплавной печи с позиции энергоресурсосбережения и положений «бережливого производства». Улучшение в работе печи приводит к повышению энерготехнологического критерия, который изменяется для выплавки 75 %-ного ферросилиция в пределах 0,293–0,317 для хорошо работающих печей и в диапазоне 0,248–0,283 для печей, работающих удовлетворительно.

**3. Впервые выявлена зависимость и получены функциональные закономерности изменения энерготехнологического критерия работы печи и удельного расхода электроэнергии на выплавку ферросплавов.** Энерготехнологический критерий в комплексе фиксирует долю технологических, электрических и тепловых потерь при выплавке, что отражается на удельном расходе электроэнергии. При мероприятиях, направленных на сокращение комплекса потерь при выплавке ферросплавов, энерготехнологический критерий возрастает, а удельный расход электроэнергии на 1 т сплава снижается.

**4. Получена зависимость изменения энерготехнологического критерия ферросплавной печи традиционной конструкции от увеличения мощности печных трансформаторов при выплавке шлаковым и бесшлаковым процессом.**

С ростом мощности ферросплавных печей происходит ухудшение их энерготехнологических параметров, вследствие реализации процесса выплавки в условиях, когда повышение мощности печей, традиционных конструкций, происходит в основном за счёт увеличения силы тока и, соответственно, диаметра электродов, а не рабочего напряжения (из-за снижения сопротивления ванны). Это увеличивает разрыв между мощностью

трансформатора и активной мощностью в ванне печи, которая направлена на технологический процесс. Ухудшается тепловая работа ванны печей большой мощности, что в комплексе снижает энерготехнологический критерий печи и увеличивает удельный расход электроэнергии по сравнению с ферросплавными печами средней мощности. Такое положение требует применения мероприятий по совершенствованию энерготехнологических параметров электропечей.

**5. Научно обоснована и экспериментально подтверждена новая технология выплавки ферросплавов с увеличенным подэлектродным промежутком (электрод-подина) для повышения активного сопротивления ванны и улучшения энерготехнологических параметров электропечи.** Технология выплавки с увеличенным подэлектродным промежутком (от 0,6–0,8 до 6,0 диаметров электрода) осуществляется без уменьшения заглубления электродов в шихту при увеличении глубины ванны, что значительно повышает энерготехнологические параметры получения ферросплавов в условиях одноэлектродного варианта печи. При этом качественно меняется картина ввода дополнительной мощности в ванну электропечи – не за счёт увеличения силы тока, а благодаря увеличению в 2,5 раза сопротивления ванны, напряжения и мощности, что энергетически более выгодно и эффективно. В результате при выплавке 45 %-ного ферросилиция улучшаются электрический КПД, коэффициент мощности, тепловой КПД без снижения извлечения ведущего элемента при получении стандартного ферросплава. Снижается удельный расход электроэнергии на выплавку и увеличивается энерготехнологический критерий ферросплавной печи (+ 35,6 %).

**6. Теоретически обоснована, предложена и опробована принципиально новая концепция выплавки ферросплавов по варианту автономных изолированных плавильных зон под электродами в ванне печи под слоем шихты и, соответственно, выпуском расплава из-под каждого электрода,** как наиболее эффективное решение научно-технической проблемы повышения активного сопротивления ванны ферросплавных печей и улучшения энерготехнологических параметров. Отличие данной схемы от существующих вариантов состоит в том, что классическая схема выплавки имеет в печи под слоем шихты «общую ванну расплава», традиционный небольшой распад электродов (около 2,2 диаметров электрода) и выпуск расплава происходит через одну лётку.

Разработанный вариант концепции (выплавки с автономными плавильными зонами) включает сочетание двух технических решений: использование технологии выплавки ферросплавов с увеличенным подэлектродным промежутком и применение электропечи со значительно увеличенным в 2,1–2,8 раза относительным распадом электродов и более глубокой ванной. Данное комплексное решение приводит к повышению в 2,2–2,6 раза сопротивления ванны, напряжения и дополнительной мощности в ванне печи (каждый показатель) без ухудшения степени извлечения ведущего элемента в сплав при получении стандартного ферросплава. В результате улучшаются коэффициент мощности, электрический и тепловой КПД печи, снижается удельный расход электроэнергии. На

примере выплавки 45 %-ного ферросилиция энерготехнологический критерий увеличился на 37,8–48,0 %.

**7. Теоретически обоснована и опробована новая технология выплавки ферросплавов в печи с увеличенным распадом электродов с дифференцированным способом загрузки шихты, что дополнительно улучшает энерготехнологические параметры агрегата.** Благодаря созданию между электродами в ванне печи зоны из малоэлектропроводных материалов (отходы из мелочи кварцита) данная технология выплавки значительно уменьшает токи «электрод–электрод» и повышает токи «электрод–подина», что дополнительно повышает активное сопротивления ванны. При выплавке 45%-ного ферросилиция, применение дифференцированного способа загрузки шихты в печь с увеличенным распадом до 4,5–6,0 диаметров электрода в 2,8–2,9 раза увеличило сопротивление ванны, напряжение и мощность, по сравнению с выплавкой в печи с обычным распадом электродов и традиционным способом загрузки шихты в печь. В результате энерготехнологический критерий работы ферросплавной печи увеличился на 57,8–64,0 %.

**8. Впервые получена зависимость величины подэлектродного промежутка в ванне ферросплавной печи от распада электродов и установлено влияние данных параметров на повышение энерготехнологического критерия работы печи вследствие увеличения рабочего напряжения.** Показано, что для лучшего распределения энергии в ванне печи большему относительному распаду электродов соответствует увеличенный подэлектродный промежуток (электрод–подина) в ванне печи под слоем шихты. Получены зависимости подэлектродного промежутка в ванне для традиционных значений распада 2,1–2,3 и для увеличенных значений до 4,5–6,0, которые выражены в диаметрах электрода.

**9. На основе энерготехнологического критерия разработана новая методика для сравнительной оценки эффективности выплавки ферросплавов в печах различных конструкций и технологий.** В результате анализа составляющих величин энерготехнологического критерия был разработан универсальный метод оценки технических решений для различных технологий выплавки ферросплавов в печах переменного тока, в печах с пониженной частотой тока, в печах постоянного тока с открытой и закрытой дугой, а также в плазменных печах.

### **Практическая значимость**

1. Практическая ценность работы заключается в дополнительно полученной информации о взаимосвязи технологических, электрических и теплотехнических параметров при шлаковой и бесшлаковой выплавке ферросплавов. Это позволило выявить факторы для улучшения комплекса энерготехнологических параметров и снижения удельных энергозатрат на выплавку ферросплавов в электропечах, а также для разработки новых технологических схем и некоторых конструктивных параметров печей. Установлено, что при бесшлаковом процессе выплавки 75%-ного ферросилиция увеличение энер-

готехнологического критерия работы ферросплавной печи от 0,248 до 0,314 соответствует снижению удельного расхода электроэнергии в диапазоне от 10,5 до 8,6 МВт·ч/т сплава. При выплавке углеродистого феррохрома увеличение энерготехнологического критерия от 0,252 до 0,326 приводит к снижению удельного расхода электроэнергии от 4,3 до 3,3 МВт·ч/т сплава.

Выявлено, что при увеличении мощности печей для выплавки ферросилиция от 16,5–22,5 МВ·А до 81 МВ·А вследствие снижения активного сопротивления ванны энерготехнологический критерий уменьшается на 13,5–26,7 %, что приводит к менее эффективной работе электропечей.

2. Решена научно-техническая проблема значительного (в 2 раза и более) повышения активного сопротивления ванны, напряжения и мощности ферросплавной электропечи без увеличения силы тока и диаметра электродов (или возможного их уменьшения) с целью улучшения энерготехнологических параметров процесса выплавки.

Разработана, опробована в опытных крупномасштабных электропечах и на Аксуском заводе ферросплавов в полупромышленном варианте новая концепция выплавки ферросплавов на примере 45 %-ного ферросилиция с увеличенным подэлектродным промежутком и повышенным до 5,6 диаметром электродов распадом электродов. В результате сопротивление ванны, мощность и рабочее напряжение увеличились в 2 раза при неизменных значениях силы тока и диаметра электродов. Улучшились коэффициент мощности, электрический и тепловой КПД печи. Удельный расход электроэнергии на 1 баз. т сплава снизился на 16,7 %. Энерготехнологический критерий печи увеличился на 29,8 % по сравнению с базовым вариантом выплавки с традиционным распадом электродов.

В дальнейшем на заводе, на основании результатов полупромышленных испытаний, на 8-ми печах РКЗ-16,5/22,5 был увеличен диаметр распада электродов от проектных размеров 2,9 м до 3,7–3,8 м и на 4-х печах РКЗ-81 от 5,2 м до 5,7–5,8 м.

3. Полученный энерготехнологический критерий ферросплавной электропечи является основой для оценки работы печей, в том числе: а) для выявления эффективных технологий выплавки ферросплавов при применении новых видов рудного сырья и углеродистых восстановителей; б) при проведении комплексного энерготехнологического аудита промышленных печей; в) при разработке новых печей и технологий в электрометаллургии.

4. На основании энергоаудита двух печей мощностью по 29 МВ·А завода «Кузнецкие ферросплавы» при выплавке 75 %-ного ферросилиция применена методика оценки работы электропечей с использованием энерготехнологического критерия ферросплавной печи. При этом применение на одной из печей увеличенного распада электродов 3,4 м, вместо с 3,0 м и углеродистых восстановителей с повышенным удельным электросопротивлением в виде полуокиса увеличило энерготехнологический критерий от 0,203 до 0,258 при снижении удельного расхода электроэнергии на 615 кВт·ч/т или на 6,8 %.

5. С позиции мероприятий, направленных на повышение энерготехнологического критерия печи, показано положительное влияние данной комплексной величины не только на удельный расход электроэнергии, а также на снижение себестоимости получаемого сплава и на увеличение удельной производительности печи на 1 МВ·А установленной мощности трансформатора для выплавки ферросилиция и углеродистого феррохрома.

Энерготехнологический критерий позволяет проводить оценку эффективности выплавки ферросплавов и выбор оптимальных решений в печах различных конструкций, как в печах переменного тока, так и в печах постоянного тока, а также в плазменных печах.

**Апробация результатов работы.** Основные положения докладывались на 29-ти мероприятиях: на XIV–XVI Международных научных конференциях «Современные проблемы электрометаллургии стали» (г. Челябинск, 2010, 2013, 2019 г. и г. Магнитогорск, 2015 г.); на III–X Международных конференциях «Металлургия – Интехэко» (г. Москва, 2010 – 2016, 2018 г.); на конференции, посвящённой 65-летию «ЦНИИчермет им. И.П.Бардина» (г. Москва 2009 г.); на Всероссийской конференции «Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных исследований и НИОКР» (г. Екатеринбург, 2011, 2013, 2018, 2020 г.); на Всероссийской конференции с Международным участием «Электротермия–2012» (г. Санкт-Петербург, 2012 г.); на Международной конференции «Энергетическая эффективность на предприятиях горно-металлургического комплекса» (г. Москва, 2012 г.); на XIII Международном конгрессе сталеплавильщиков (г. Полевской, 2014 г.); на Международной конференции «Физико-химические основы металлургических процессов», им. академика А.М. Самарина (г. Москва, 2017, 2019 г.) и других.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- комплексный анализ работы ферросплавной печи для выявления факторов улучшения энерготехнологических параметров при увеличении мощности электропечей;
- комплексный параметр – энерготехнологический критерий работы ферросплавной электропечи;
- влияние увеличения мощности печных трансформаторов на энерготехнологический критерий ферросплавной печи;
- зависимость энерготехнологического критерия ферросплавной печи от удельного расхода электроэнергии на выплавку сплава;
- анализ составляющих величин энерготехнологического критерия работы ферросплавной печи (извлечение ведущего элемента в сплав, тепловой КПД, коэффициент мощности печи, электрический КПД, коэффициент загрузки печного трансформатора);
- анализ технологии выплавки различных сплавов (ферросилиция, феррохрома, ферромарганца, ферроникеля) и кремния с позиции энерготехнологического критерия ферросплавной электропечи;

– влияние подэлектродного промежутка и распада электродов на энерготехнологический критерий ферросплавной электропечи;

– оценка эффективности технических решений (технологии выплавки, конструкции печей) с помощью энерготехнологического критерия работы ферросплавной печи.

**Область исследования.** Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.16.02 (2.6.2) – Металлургия черных, цветных и редких металлов: п. 11 – Пирометаллургические процессы и агрегаты; п. 12 – Электрометаллургические процессы и агрегаты; п. 17 – Материало- и энергосбережение при получении металлов и сплавов.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликована монография «Энерготехнологические параметры выплавки ферросплавов в электропечах». – М.: Издательский дом МИСиС. – 2018. – 216 с.

**Общее количество публикаций** по теме диссертации – 77, в том числе в журналах Перечня ВАК Минобрнауки России – 28, авторские свидетельства – 4, статьи в других журналах и сборниках конференций – 44, монография – 1.

В изданиях, которые входят в Международные реферативные базы данных систем цитирования, опубликовано 9 работ в переводных периодических изданиях: «Steel in Translation» – 3 (Scopus, quartile Q2); «Metallurgist» – 6 (Scopus, quartile Q3).

**Личное участие автора** заключается в определении актуальности, цели и постановке задач исследования, разработке методик, организации и проведении исследований, обработке, анализе и обобщении результатов исследований; в формулировании выводов; участие в апробации работы и написании статей.

### **Структура и объём работы**

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и приложений. Материал работы изложен на 302 страницах машинописного текста, содержит 36 рисунков, 32 таблицы, библиографический список включает 228 источников, из них 34 иностранные источники.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, представлены цель и задачи работы, её научная новизна и практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту. Также приведены сведения об апробации результатов работы, методология и методы исследования, используемые для решения поставленных задач.

**В первой главе** рассмотрено состояние вопроса производства ферросплавов в электропечах. Приведён аналитический обзор существующих тенденций повышения показателей печей для выплавки ферросплавов шлаковым и бесшлаковым процессом, а также рассмотрены технические решения по улучшению энерготехнологических параметров выплавки сплавов кремния, марганца и хрома на основе отечественного и зарубежного опыта. Показано, что с увеличением мощности трансформаторов печей происходит ухудшение показателей выплавки и дополнительно при снижении качества рудного сырья и восстановителей. Отмечено, что сила тока электродов (несколько десятков килоампер) возрастает быстрее рабочего напряжения, снижается сопротивление ванны.

К тому же рост мощности печей не приводит к аналогичному повышению производительности агрегата, так как из-за электрических потерь, увеличивается разрыв между мощностью трансформатора и мощностью в ванне печи. Для улучшения используются углеродистые восстановители с повышенным удельным электросопротивлением (полукоксы, газовые угли, спецкоксы и др.). Наибольший эффект от повышения активного сопротивления ванны составляет 5–10 %. Проведён анализ технических решений по совершенствованию конструкций печных агрегатов, в том числе в печах с полыми электродами; с разряжением под сводом; с пониженной частотой тока; в печах постоянного тока с открытой и закрытой дугой, а также в плазменных печах.

**Во второй главе** исследованы энергетико-технологических параметров выплавки ферросплавов в электропечах. Более 20 % электроэнергии страны расходуется в металлургии для получения чёрных, цветных металлов и сплавов. Производство ферросплавов в электропечах рудово-составительным процессом является одним из наиболее энергоёмких и материалоёмких в металлургии. Расходы материалов шихты на 1 т сплава, приведены ниже:

Продукт выплавки	Расход рудных материалов, кг/т	Общий расход шихты, кг/т
Углеродистый феррохром	2000 – 2400	2300 – 3000
Углеродистый ферромарганец	2500 – 3200	3200 – 3500
45 %-ный ферросилиций	920 – 1050	1920 – 2060
65 %-ный ферросилиций	1520 – 1570	2530 – 2670
75 %-ный ферросилиций	1890 – 1930	2850 – 3030
Технический кремний	2430 – 2540	4130 – 4240
Черновой ферроникель	7150 – 8350	7350 – 8530

В технологическом процессе вынуждены использовать сравнительно бедные рудные материалы, поэтому извлечение ведущего элемента снижается. Увеличиваются объёмы перерабатываемого сырья на 1 т сплава и удельные расходы электроэнергии. Получение ферросплавов является весьма энергозатратным и улучшение показателей выплавки в электропечах является важной и актуальной задачей.

В результате повышения мощности ферросплавных печей растут активные и индуктивные потери электроэнергии, которые пропорциональны квадрату силы тока электрода. При повышении мощности печей от 10,5 до 105 МВ·А диаметр самообжигающихся электродов увеличился от 900 до 1800–2000 мм, то есть в 2,0–2,2 раза. Сила тока электрода возросла от 32–37 до 160 кА или в 4,3–5,0 раза. При этом рабочее напряжение увеличилось не так значительно от 130 до 230–300 В или в 1,8–2,3 раза.

С ростом мощности печей снижается электрический КПД и особенно естественный коэффициент мощности (Рисунок 1). Дорогостоящим решением является дополнительная комплектация печи установкой продольно-ёмкостной компенсации (УПК) реактивной мощности. Вновь вводимые печи не превышают уровень мощности 81–105 МВ·А, что достигнуто в предыдущие десятилетия.

Рассмотрена реконструкция печи с увеличением мощности на заводе в Варгоне, Швеция. Мощность трансформаторов возросла от 75 до 105 МВ·А (+ 40 %), а активная мощность в ванне печи увеличилась от 45 до 50 МВт (+11 %) для выплавки ферросилиция.

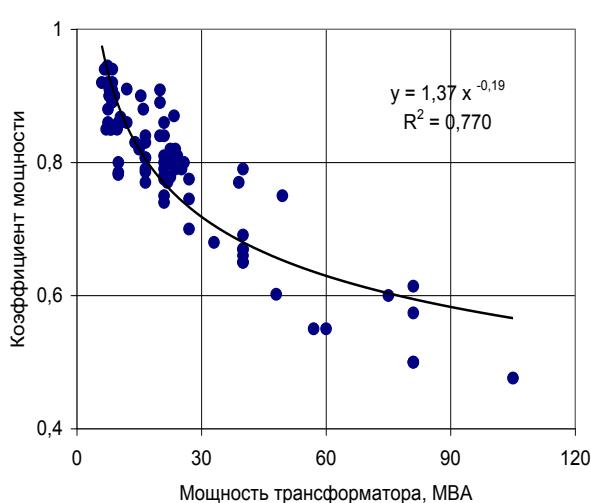


Рисунок 1 – Снижение естественного коэффициента мощности на 87 отечественных и зарубежных печах, при увеличении печных трансформаторов и выплавке ферросилиция (коэффициент корреляции  $R = 0,878$ )

Отмечено, что увеличение мощности печей, и их размеров отрицательно влияет на тепловую работу. По данным Воробьёва В.П., при повышении мощности печей от 10,5 до 25,0 МВ·А удельный расход электроэнергии не снизился, а увеличился от 8500 до 9800 кВт·ч/т (+15,3 %) при выплавке 75 %-ного ферросилиция. Такое явление отмечено при росте мощности до 40–81 МВ·А.

Рассмотрено аналитическое исследование причин ухудшения параметров ферросплавных печей. На основании анализа зависимости полезного напряжения от мощности в ванне получено выражение сопротивления ванны традиционной ферросплавной печи:

$$R = C^2 \cdot (P)^k, \quad (1)$$

где:  $R$  – полезное сопротивление ванны печи;  $C$  – коэффициент пропорциональности;  $P$  – полезная мощность;  $k$  – показатель степени ( $k = 2n - 1$ ), где  $n = 0,25 - 0,33$ .

В выражении (1) показатель степени ( $k = 2n - 1$ ) при данных « $n$ », имеет отрицательные значения. Поэтому, повышение мощности обычных ферросплавных печей приводит к снижению величины сопротивления ванны, что ухудшает энерготехнологические параметры. Этим объясняется невыгодное явление, когда рост мощности печных трансформаторов не соответствует приросту мощности в ванне и производительности печи.

Проведены исследования по изменению активного сопротивления ванны при увеличении диаметра электродов сначала на традиционной электролитической модели ферросплавной печи, а затем для 43 печей для выплавки ферросилиция мощностью 7,5 – 81 МВ·А, с диаметром электродов от 750 до 1900 мм (Рисунок 2). Показано, что увеличение диаметра электродов существенно снижает активное сопротивление ванны ферросплавной печи.

В соответствии с другими параметрами печей при увеличении силы тока электрода и диаметра электродов ухудшаются электрические параметры и прирост мощности в ванне печи. Для улучшения показателей ферросплавных агрегатов необходимо рассмотреть комплекс технологических, электрических параметров выплавки, с учётом параметров тепловой работы ванны и конструкции печей.

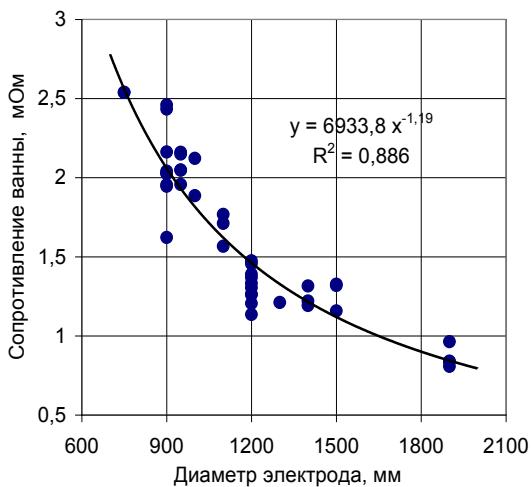


Рисунок 2 – Снижение активного сопротивления ванны 43 печей с мощностью трансформаторов 7,5–81 МВ·А при выплавке 45 %-ного ферросилиция при различных диаметрах электродов (коэффициент корреляции  $R = 0,941$ )

фазных напряжений для печей в зависимости от мощности печного трансформатора для выплавки различных ферросплавов.

**Извлечение ведущего элемента в сплав** (кремния, марганца, хрома и других) характеризует технологию выплавки и в общей форме является безразмерной величиной:

$$\eta_{\text{изв}} = [\text{Me}]_{\text{спл}} : \langle \text{Me} \rangle_{\text{шахты}}, \quad (3)$$

где:  $[\text{Me}]_{\text{спл}}$  – количество ведущего элемента в ферросплаве;  
 $\langle \text{Me} \rangle_{\text{шахты}}$  – общее количество ведущего элемента в шихте.

На основании этого при выплавке ферросплавов находят распределение ведущего элемента: в сплав; в шлак и в улёт с отходящими газами.

**Отношение тока электрода к рабочему напряжению.** В ферросплавной печи сила тока электрода значительна (в десятки килоампер) при сравнительно невысоком рабочем напряжении, то в качестве сравнения использовали отношение силы тока к напряжению  $I/U$ . Ранее для эффективной работы печей для ферросилиция рекомендовали отношение  $I/U$  около 300–350. В дальнейшем при увеличении мощности отношение  $I/U$  возросло до 460–650 и далее до 750, но показатели работы печей ухудшились.

**Критерий ЭП** (критерий электрического подобия) Микулинского А.С. для рудо-восстановительных печей рассматривали при выплавке различных сплавов:

$$\text{ЭП} = (U_{\text{пф}} \cdot d_3) / (I \cdot \rho) \quad \text{или} \quad R \cdot d_3 = \text{ЭП} \cdot \rho \equiv \text{ЭП}', \quad (4)$$

где:  $U_{\text{пф}}$  – полезное фазное напряжение;  $d_3$  – диаметр электрода;  $I$  – сила тока электрода;  $\rho$  – удельное электросопротивление ванны;  $R$  – полезное сопротивление ванны.

Критерий ЭП в первичной форме является безразмерной величиной. Однако получение достоверных величин удельного электросопротивления в неоднородной среде ферросплавной ванны является сложной задачей. Из-за трудности разграничения вели-

Третья глава посвящена разработке комплексного параметра работы электропечи при выплавке ферросплавов. На основании работ отечественных и зарубежных исследователей был проведён анализ параметров, которые ранее использовали для оценки работы печей.

**Полезное фазное напряжение.** Одним из основных параметров сравнения считали полезное фазное напряжение на вторичной стороне печи:

$$U_{\text{пф}} = (U_{\text{раб}} \cdot \cos \varphi \cdot \eta_{\text{эл}}) : 1,73, \quad (2)$$

где:  $U_{\text{раб}}$  – рабочее напряжение на ступени трансформатора;  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности печи;  $\eta_{\text{эл}}$  – электрический КПД печи.

Также был регламентирован диапазон полезных

чин ЭП и  $\rho$ , использовали параметр ( $\text{ЭП} \cdot \rho$ ), который применялся в расчётах рабочего напряжения электропечей.

**Общий КПД** (энергетический КПД). В ряде работ для оценки эффективности электропечей рекомендуется использовать безразмерную величину, так называемый общий КПД или энергетический КПД печного агрегата:

$$\eta_{\text{эн}} = \eta_{\text{эл}} \cdot \eta_{\text{т}}, \quad (5)$$

где:  $\eta_{\text{эл}}$  – электрический КПД печи;  $\eta_{\text{т}}$  – тепловой КПД печи.

В такой форме данный параметр не учитывал ряд технологических особенностей.

**Отношение подэлектродного промежутка к диаметру электрода.** По данным Струнского Б.М., предложено оценивать работу ферросплавной печи по величине подэлектродного промежутка относительно диаметра электрода. На основании исследований на электролитических моделях и практических данных печей получено, что оптимальным является подэлектродный промежуток  $2/3$  от диаметра электрода.

**Активное сопротивление ванны.** Для оценки работы и хода печей ориентируются на активное сопротивление ванны при выплавке однотипных сплавов, что определяется следующим выражением:

$$R_{\text{в}} = (U_{\text{раб}} \cdot \cos \varphi) : (1,73 \cdot I_s), \quad (6)$$

где:  $U_{\text{раб}}$  – рабочее напряжение на ступени трансформатора;  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности печи;  $I_s$  – сила тока электрода.

Также активное сопротивление ванны является основой для регулирования процесса выплавки в ферросплавных печах постоянного тока.

В целом для оценки эффективности работы ферросплавных печей, как мощных потребителей электроэнергии и шихтовых материалов, не было выработано единого подхода, который позволил в комплексе характеризовать работу технологического агрегата с позиции энергоресурсосбережения.

Эксплуатация ферросплавной печи характеризуется значительным количеством электрических, технологических, теплотехнических и конструктивных параметров. Для проведения анализа комплекса параметров предварительно были выбраны два основных показателя, которые характерны для работы любого технологического, в том числе, металлургического агрегата, и определяют эффективность его работы при следующем условии: производительность –  $\max$ ; удельный расход электроэнергии –  $\min$ . Данные параметры были выведены из общей системы показателей печи. Далее из общего спектра оставшихся показателей были получены четыре комплекса величин:

- **Комплекс 1.** Электрические параметры;
- **Комплекс 2.** Технологические параметры;
- **Комплекс 3.** Теплотехнические параметры;
- **Комплекс 4.** Параметры конструкции печи.

Следует отметить, что наряду с абсолютными величинами рассматриваемых параметров, относительные величины – это обобщающие параметры, которые выражают ме-

ру количественных соотношений, присущих конкретным технологическим процессам и объектам, по данным работ Степанова В.Г.\* В данном случае, коэффициент мощности печи это отношение активной мощности к полной используемой мощности. Такой технологический параметр, как извлечение ведущего элемента в сплав, тоже является отношением количества ведущего элемента в сплаве к количеству ведущего элемента в шихте печи при выплавке.

В дальнейшем, в соответствии с методикой монографии Степанова В.Г.\* , которая используется для обработки большого массива данных в макроэкономических исследованиях, в каждой группе показателей проводили выборку параметров по следующей схеме:

- **Группа 1** – абсолютные, в том числе удельные и относительные величины;
- **Группа 2** – относительные и удельные величины;
- **Группа 3** – относительные величины.

В процессе выборки в каждом комплексе параметров рассматривали абсолютные величины и их взаимосвязи с относительными величинами. Далее в конкретном случае, выявлялись взаимосвязи, когда абсолютные величины параметров могут быть выражены через относительные величины. В результате выборки такие параметры исключались из системы. На основании анализа получен комплекс энергетехнологических параметров выплавки ферросплавов, который характеризует работу электропечи и включает следующее: извлечение ведущего элемента в сплав; тепловой КПД печи; коэффициент мощности печи; электрический КПД; коэффициент загрузки трансформатора. По данным работы Черновой Т.В.\*\*, выделенные или полученные относительные величины могут образовывать систему взаимосвязанных комплексных показателей такие, как комплексная относительная величина сравнения.

Таким образом, для оценки работы ферросплавной печи из массы параметров была получена комплексная величина, которая характеризует электрический режим, тепловую работу печи и технологию выплавки ферросплавов. Комплексный параметр, как безразмерная величина, получил название – энергетехнологический критерий работы ферросплавной электропечи, который в общей форме имеет следующий вид:

$$Sh = K_{ит} \cdot \cos \varphi \cdot \eta_{эл} \cdot \eta_t \cdot \eta_{изв}, \quad (7)$$

где:  $K_{ит}$  – коэффициент загрузки трансформатора;  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности печи;  $\eta_{эл}$  – электрический КПД;  $\eta_t$  – тепловой КПД;  $\eta_{изв}$  – извлечение ведущего элемента.

**Физический смысл энергетехнологического критерия** работы ферросплавной электропечи состоит в том, что он определяет долю энергии от источника тока, а именно её полезную часть, пошедшую на процесс получения ферросплава (ферросилиция, феррохрома, ферромарганца), с учётом тепловых потерь и степени извлечения ведущего элемента в сплав.

---

\* Степанов В.Г. Статистика. – М.: МИЭИМ. – 2007. – 172 с. \*\*Чернова Т.В. Экономическая статистика.– Таганрог: Издательство ТРТУ. – 1999. – 140 с.

С позиции энерготехнологического критерия были проанализированы параметры выплавки 75%-ного ферросилиция на разных режимах эксплуатации, на номинальном и повышенном рабочем напряжении (Таблица 1) и выплавки феррохрома (Таблица 2).

Таблица 1 – Энерготехнологические параметры выплавки 75 %-ного ферросилиция

П а р а м е т р ы	Вариант	
	I	II
Мощность трансформатора, МВ·А	10,50	10,50
Используемая мощность трансформатора, МВ·А	10,01	10,04
Рабочее напряжение, В	<b>148</b>	<b>160</b>
Сила тока электрода, кА	39,0	36,2
Коэффициент мощности печи	0,810	0,830
Электрический КПД	0,833	0,852
Тепловой КПД	0,525	0,496
Извлечение Si в сплав	0,890	0,863
Коэффициент загрузки трансформатора	0,953	0,956
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т	<b>8725</b>	9278
<b>Энерготехнологический критерий работы печи</b>	<b>0,301</b>	<b>0,289</b>

Прим.: Шкирмонтов А.П., Рошин В.Е. // Сталь. – 2020. – № 2. – С. 20–25.

Таблица 2 – Энерготехнологические параметры выплавки углеродистого феррохрома

П а р а м е т р ы	П е ч и	
	I	II
Мощность трансформатора, МВ·А	21,0	23,0
Используемая мощность трансформатора, МВ·А	15,83	18,19
Активная мощность печи, МВт	13,77	17,01
Рабочее напряжение, В	180,0	185,0
Сила тока электрода, кА	50,7	56,7
Общее содержание Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (в хроморудном сырье), %	46,97	48,89
Содержание Cr в сплаве, %	69,7	70,3
Содержание углерода в сплаве, %	7,70	8,08
Кратность шлака	1,1–1,2	1,0–1,1
Содержание Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> в шлаке, %	2,62	2,52
Содержание SiO <sub>2</sub> в шлаке, %	30,80	29,70
Коэффициент мощности печи	0,870	0,935
Электрический КПД	0,882	0,881
Тепловой КПД	0,433	0,493
Извлечение Cr в сплав	0,903	0,914
Коэффициент загрузки трансформатора	0,754	0,791
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т	4350	<b>3770</b>
<b>Энерготехнологический критерий работы печи</b>	<b>0,226</b>	<b>0,294</b>

Прим.: а) Шкирмонтов А.П., Рошин В.Е.// Сталь. – 2020. – № 2. – С. 20 – 25;

б) печь II с установкой компенсации реактивной мощности

При выплавке ферросилиция увеличение рабочего напряжения уменьшает заглубление электродов в шихту и вызывает повышенный улёт кремния в газовую фазу в виде SiO<sub>г</sub>, который образуется и участвует в стадиях восстановления кремнезёма углеродом.

Поэтому снижается извлечение кремния в сплав с 0,890 до 0,863. Также увеличивается доля ответвления тока между электродами, что приводит к разогреву колошника печи.

В итоге при выплавке ферросилиция снижается тепловой КПД печи на 5,5 % и повышается удельный расход электроэнергии на 553 кВт·ч/т (+ 6,3 %), несмотря на более высокие электрические параметры (коэффициента мощности, электрического КПД). При этом повышение удельного расхода электроэнергии с 8725 до 9278 кВт·ч/т соответствует снижению энерготехнологического критерия ферросплавной печи от 0,301 до 0,289.

Аналогично, в качестве шлакового процесса, рассмотрены показатели выплавки углеродистого феррохрома (См.Таблица 2). Выплавка в печах мощностью 21 МВ·А и 23 МВ·А (с УПК), показала различие в работе по энерготехнологическому критерию 0,226 и 0,294 соответственно. Существенно улучшился коэффициент мощности, энерготехнологический критерий и удельный расход электроэнергии ниже на 580 кВт·ч/т (- 13,3 %), по сравнению с печью без УПК. Следовательно, увеличение энерготехнологического критерия соответствует улучшению в работе электропечей.

Рассмотрен вопрос увеличения мощности печных трансформаторов и изменение энерготехнологического критерия ферросплавной электропечи (Рисунок 3), что сопровождается снижением комплексного параметра, так как это не приводит к эквивалентному увеличению мощности в ванне и производительности печи. Энерготехнологический критерий, как результирующая величина комплекса параметров, количественно отражает данную тенденцию в электрометаллургии ферросплавов.

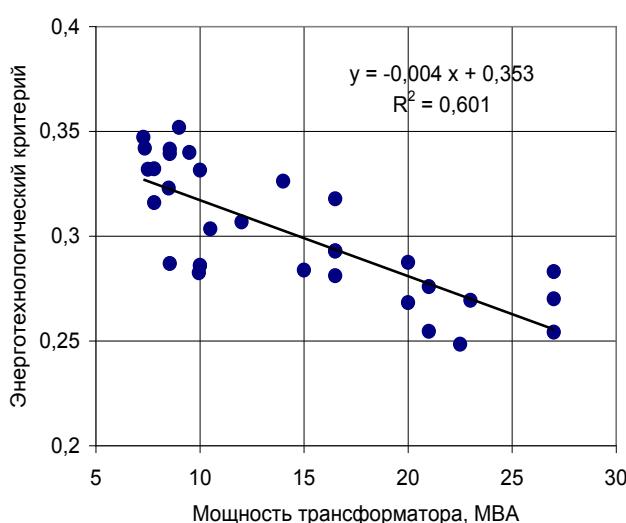


Рисунок 3 – Изменение величины энерготехнологического критерия ферросплавной электропечи при выплавке 45 %-ного ферросилиция для 32-х печей с увеличением мощности трансформаторов от 7,3 до 27 МВ·А без УПК (коэффициент корреляции  $R = 0,775$ )

На Рисунке 3 показана зависимость энерготехнологического критерия от мощности трансформатора. Установлено, что с увеличением мощности трансформатора происходит снижение энерготехнологического критерия. Коэффициент корреляции  $R = 0,775$ .

Улучшению ситуации способствуют мероприятия направленные на повышение активного сопротивления ванны ферросплавной электропечи.

Исследовано соотношение энерготехнологического критерия печи и удельного расхода электроэнергии. С позиции энерготехнологического критерия был проведён анализ работы 27 отечественных и зарубежных печей при выплавке 75 %-ного ферросилиция (Рисунок 4). При этом наблюдается зависимость увеличения энерготехнологического критерия печи при снижении удельного расхода электроэнергии на 1 баз. т сплава. На основании проведённого анализа, следует, что снижение удельного расхода электроэнергии на выплавку сплава, соответствует увеличению энерготехнологического критерия и повышению уровня эффективности работы ферросплавной печи с позиции энергоресурсосбережения.

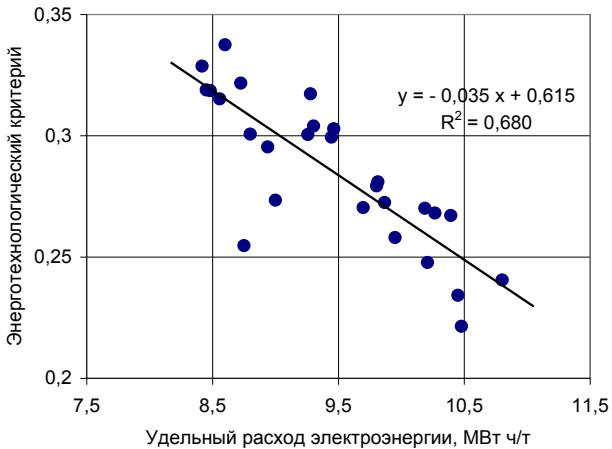


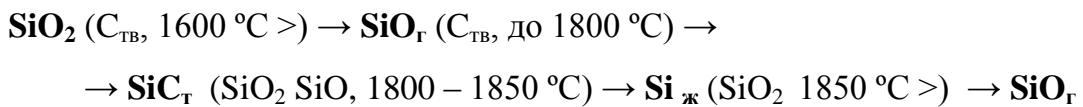
Рисунок 4 – Изменение энергетехнологического критерия ферросплавной печи при различных величинах удельного расхода электроэнергии для 27-ми отечественных и зарубежных печей мощностью 10 – 49,5 МВ·А (без УПК) при выплавке 75 %-ного ферросилиция (коэффициент корреляции  $R = 0,825$ )

ФС20–ФС90 и технического кремния для 34 печей, работающих углеродотермическим процессом, получена зависимость извлечения кремния от содержания его в продуктах выплавки и приведено на Рисунке 5. Показано, что степень извлечения ведущего элемента в сплав снижается с повышением содержания кремния в продуктах выплавки по следующему выражению:

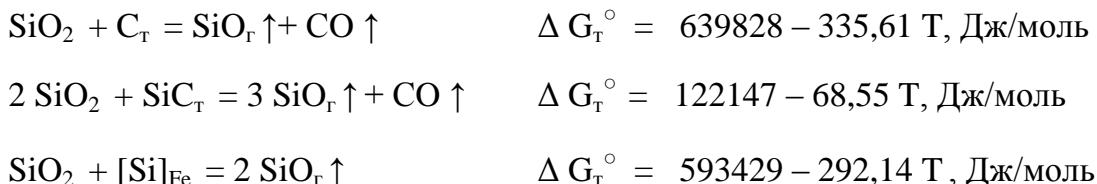
$$\eta_{\text{si}} = -0,0062 [\text{Si}]^2 + 0,392 [\text{Si}] + 91,09 , \quad (8)$$

где:  $\eta_{\text{si}}$  – извлечение кремния в сплав;  $[\text{Si}]$  – содержание кремния в сплаве, %.

В общем виде процесс восстановления кремния углеродотермическим процессом может быть представлен по следующей схеме:



При выплавке высокопроцентных марок ферросилиция, а также при дальнейшем выводе железа из шихты происходит повышенный улёт  $\text{SiO}_r$  в газовую фазу по следующей схеме:



Более высокая скорость образования оксида кремния по сравнению со скоростью его потребления в плавильной зоне на образование карбида кремния и кремния, является основной причиной значительных потерь ведущего элемента при получении высокопроцентных марок ферросилиция и технического кремния (вывод железа из системы). При

**В четвёртой главе** приведён анализ составляющих величин энергетехнологического критерия работы ферросплавной печи.

**Извлечение ведущего элемента.** Данный параметр является основным в восстановительном процессе получения ферросплавов. Одним из факторов, которые влияют на степень извлечения, является максимально возможное содержание ведущего элемента в рудной части шихты при минимальном содержании вредных примесей. Рассмотрены вопросы извлечения кремния, марганца, хрома, никеля.

На основании проведённого анализа технологии получения ферросилиция ФС20–

ФС90 и технического кремния для 34 печей, работающих углеродотермическим процессом, получена зависимость извлечения кремния от содержания его в продуктах выплавки и приведено на Рисунке 5. Показано, что степень извлечения ведущего элемента в сплав снижается с повышением содержания кремния в продуктах выплавки по следующему выражению:

$$\eta_{\text{si}} = -0,0062 [\text{Si}]^2 + 0,392 [\text{Si}] + 91,09 , \quad (8)$$

где:  $\eta_{\text{si}}$  – извлечение кремния в сплав;  $[\text{Si}]$  – содержание кремния в сплаве, %.

**В четвёртой главе** приведён анализ составляющих величин энергетехнологического критерия работы ферросплавной печи.

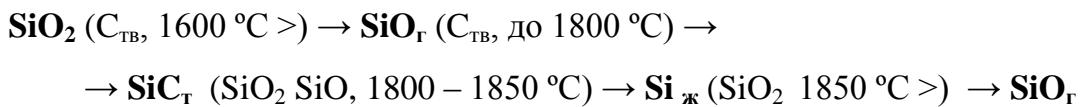
**Извлечение ведущего элемента.** Данный параметр является основным в восстановительном процессе получения ферросплавов. Одним из факторов, которые влияют на степень извлечения, является максимально возможное содержание ведущего элемента в рудной части шихты при минимальном содержании вредных примесей. Рассмотрены вопросы извлечения кремния, марганца, хрома, никеля.

На основании проведённого анализа технологии получения ферросилиция ФС20–ФС90 и технического кремния для 34 печей, работающих углеродотермическим процессом, получена зависимость извлечения кремния от содержания его в продуктах выплавки и приведено на Рисунке 5. Показано, что степень извлечения ведущего элемента в сплав снижается с повышением содержания кремния в продуктах выплавки по следующему выражению:

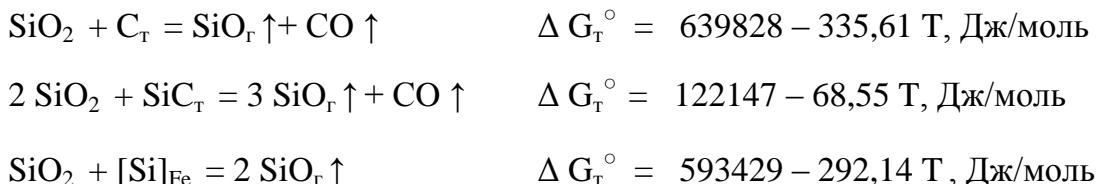
$$\eta_{\text{si}} = -0,0062 [\text{Si}]^2 + 0,392 [\text{Si}] + 91,09 , \quad (8)$$

где:  $\eta_{\text{si}}$  – извлечение кремния в сплав;  $[\text{Si}]$  – содержание кремния в сплаве, %.

В общем виде процесс восстановления кремния углеродотермическим процессом может быть представлен по следующей схеме:



При выплавке высокопроцентных марок ферросилиция, а также при дальнейшем выводе железа из шихты происходит повышенный улёт  $\text{SiO}_r$  в газовую фазу по следующей схеме:



Более высокая скорость образования оксида кремния по сравнению со скоростью его потребления в плавильной зоне на образование карбида кремния и кремния, является основной причиной значительных потерь ведущего элемента при получении высокопроцентных марок ферросилиция и технического кремния (вывод железа из системы). При

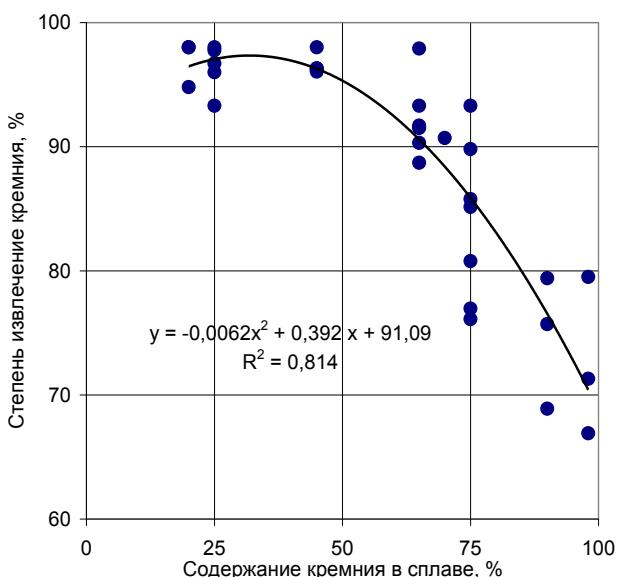


Рисунок 5 – Изменение степени извлечения кремния при выплавке на кусковой шихте различных марок ферросилиция и кремния для 34 электропечей (коэффициент корреляции  $R = 0,902$ )

этом по данным Рябчикова И.В., Толстогузова Н.В., в газовой фазе отмечается высокое содержание оксида кремния до 50–60 %  $\text{SiO}_2$  при температуре 1830–1850 °C.

Рассмотренный вариант отражается на энергетехнологических параметрах выплавки кремнистых сплавов. Показано, что, при переводе печи мощностью 16,5 МВ·А с выплавки ферросилиция ФС45 на ФС75, энергетехнологический критерий печи снижается от 0,311 до 0,277. При мощности печи 29 МВ·А при аналогичном переводе, энергетехнологический критерий снижается с 0,271 до 0,241, в том числе из-за ухудшения электрических параметров. Также проанализированы зависимости извлечения марганца, хрома, никеля при выплавке соответствующих сплавов в электропечах.

**Тепловой КПД печи.** Ферросплавная печь, работающая непрерывным рудовосстановительным процессом, относится к низкошахтным электропечным агрегатам. Глубина ванны печи относительно невелика и составляет 2,0–2,2 диаметра электрода, что определяет основную долю тепловых потерь через колошник печи с большим количеством отходящих газов и излучением, несмотря на выплавку в реакционной зоне под слоем шихты.

Исследованы энергетехнологические параметры выплавки 75 %-ного ферросилиция для 37 отечественных и зарубежных печей с круглой ванной и мощностью трансформаторов 8,5–49,5 МВ·А. Тепловой КПД печей в зависимости от режима работы изменялся от 0,390 до 0,525 (Рисунок 6). Печи небольшой и средней мощности имеют относительно неплохие величины теплового КПД, в основном диапазоне 0,470–0,500.

Повышение теплового КПД печи от 0,450 до 0,500 соответствует изменению энергетехнологического критерия от 0,273 до 0,320 при близких величинах извлечения ведущего элемента. Тепловой КПД печи определяется на основе статей расхода теплового баланса плавки, который составляется на базе материального баланса. В соответствии с тепловым балансом выплавки кремнистых сплавов, такие статьи расхода, как физическое тепло газов, потенциальная энергия отходящих газов и тепло на излучение колошника, составляют в сумме около 44–48 %. Потери тепла кожухом ванны находятся в пределах 1,5–3,5 %, в зависимости от мощности и вариантов футеровки печи. Другие статьи расхода (тепло на восстановление оксидов, тепло сплава и шлака) составляют в сумме 46–50 %. Для шлакового процесса, например для выплавки углеродистого ферромарган-

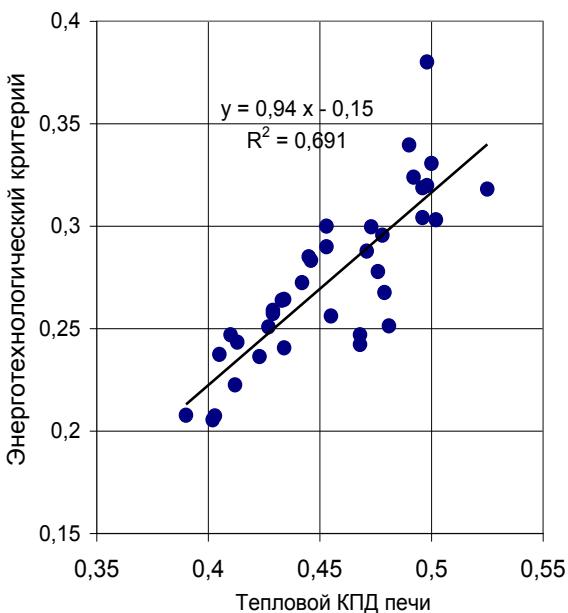


Рисунок 6 – Изменение энерготехнологического критерия ферросплавной печи и теплового КПД при выплавке 75 %-ного ферросилиция для 37-ми электропечей 8,5–49,5 МВ·А (коэффициент корреляции  $R=0,831$ )

раза, чем другие параметры. Следовательно, доля его влияния на работу печи значительно выше, в том числе на удельный расход электроэнергии и производительность.

**Коэффициент мощности печи.** Коэффициент мощности – это отношение активной мощности к используемой мощности на вторичной стороне электропечной установки. Данный параметр определяет долю реактивных (индуктивных) потерь в короткой сети печи и может быть выражен через активное сопротивление ванны печи, а также через активное и реактивное (индуктивное) сопротивление короткой сети:

$$\cos \varphi = (R_b + R_{kc}) : [(R_b + R_{kc})^2 + (X_{kc})^2]^{1/2}, \quad (9)$$

где:  $R_b$  – активное сопротивление ванны ферросплавной печи, мОм;  $R_{kc}$  – активное сопротивление короткой сети, мОм;  $X_{kc}$  – реактивное сопротивление короткой сети, мОм.

В связи с тем, что индуктивное сопротивление ванны электропечи является весьма малой величиной по сравнению с индуктивным сопротивлением короткой сети, то при определённых допущениях, в расчётах может не учитываться. С увеличением мощности ферросплавных печей происходит снижение активного сопротивления ванны и падение коэффициента мощности и в результате ухудшаются энерготехнологические параметры выплавки. Анализ работы отечественных и зарубежных ферросплавных печей показал, что увеличение мощности трансформаторов от 10,5 до 105 МВ·А снижается величину естественного коэффициента мощности (см. Рисунок 1). Поэтому, дальнейшее повышение мощности печей является научно-технической проблемой. Это связано с тем, что рост мощности трансформаторов, не приводит к эквивалентному повышению активной

части расхода (тепло на восстановление оксидов, тепло сплава, тепло шлака и химическое тепло углерода ферромарганца) составляют до 50–52 % от суммы затрат тепла.

В целом тепловой КПД низкошахтной ферросплавной электропечи, с учётом основных потерь тепла, имеет невысокие значения. Для бесшлакового процесса выплавки ферросплавов в открытых печах он составляет около 0,46–0,52 и для закрытых печей равен 0,42–0,48. Для шлакового процесса выплавки ферросплавов тепловой КПД достигает уровня 0,52–0,54, в соответствии с данными работ Егорова А.В. и Чернышова Е.А.

Ухудшение тепловой работы ванны ферросплавной печи отрицательно влияет на энерготехнологический критерий. Величина теплового КПД существенно ниже в 1,5–2,0

мощности в ванне и повышению производительности печей. Соответственно отмечено значительное количество разработок в области технологии и различных конструкций печей направленных на решение данной проблемы.

**Электрический КПД печи.** Электрический КПД ферросплавной печи характеризует долю активных (омических) потерь электроэнергии в короткой сети. Данный параметр определяется как отношение полезной мощности печи, пошедшей на технологический процесс выплавки, к величине активной мощности печи. Также величина электрического КПД печи может быть определена через активное сопротивление ванны и короткой сети по следующему выражению:

$$\eta_{\text{эл}} = R_{\text{в}} : (R_{\text{в}} + R_{\text{кс}}), \quad (10)$$

где:  $R_{\text{в}}$  – активное сопротивление ванны ферросплавной печи, мОм;

$R_{\text{кс}}$  – активное сопротивление короткой сети, мОм.

Поэтому, снижение активного сопротивления ванны ферросплавной печи, соответствующее выражению (10) приводит к уменьшению электрического КПД и наоборот. На основании параметров 43-х электропечей для выплавки ферросилиция и проведённого анализа получены следующие величины параметров для различных групп печей мощностью от 10,5 до 81 МВ·А. Диапазон значений электрического КПД печей не такой большой, как для коэффициента мощности, и составляет от 0,916 до 0,836 (среднее значение – 0,876). При реконструкции коротких сетей печей возможно улучшить величины электрического КПД.

**Коэффициент загрузки трансформатора.** Коэффициент загрузки трансформатора определяется отношением используемой мощности печи к установленной базовой мощности печных трансформаторов. Анализ данных по 92-м ферросплавным печам в диапазоне от 7,3 до 81 МВ·А, показал, что с увеличением мощности печей данный параметр снижается. Отмечено, что для печей небольшой мощности величина близка к условию  $K_{\text{ит}} \approx 1$ . При повышении мощности печей до 40–81 МВ·А загрузка трансформатора снижается до 0,75–0,80 и менее. Основная причина этого явления, состоит в снижении активного сопротивления ванны печи и повышении отношения тока к напряжению с увеличением мощности печей. При этом создаются условия, при которых весьма мощный токоприёмник промышленного предприятия, которым является ферросплавная печь, не может в полной мере забрать электроэнергию из энергосистемы. Поэтому установленная мощность трансформаторов значительно отличается от используемой мощности в ванне и ограничивает производительность печи.

**В пятой главе** рассмотрена выплавка ферросплавов с позиции энерготехнологического критерия работы электропечи.

**Выплавка ферросилиция.** Процесс выплавки в зависимости от марки сплава является весьма энергоёмким и материалоёмким (разд. гл. 2). Удельный расход электроэнергии для выплавки ФС45–ФС75 находится в пределах от 4650–4900 до 8600–8900 кВт·ч/т и выше. Теоретический расход энергии в расчёте на 1 т сплава (на основе химических

реакций) составляет для ФС45 – 2520 кВт·ч/т, а для ФС75 – 4210 кВт·ч/т, в соответствии с данными Щедровицкого Я.С. Фактические удельные расходы электроэнергии на печах практически в 2 раза выше. Структура затрат на выплавку 1 т ферросилиция следующая: рудное сырьё – 5–15 %; электроэнергия – 43–55 %; углеродистый восстановитель – 20–25 % и прочие затраты.

Извлечение кремния при выплавке основных марок ферросилиция достаточно высоко от 96–98 % до 85 %. С увеличением содержания кремния в сплаве, степень его извлечения снижается, вследствие повышенного улёта кремния в виде  $\text{SiO}_g$  с отходящими газами. Диаграмма составляющих энерготехнологического критерия печи при выплавке ферросилиция приведена на Рисунке 7.

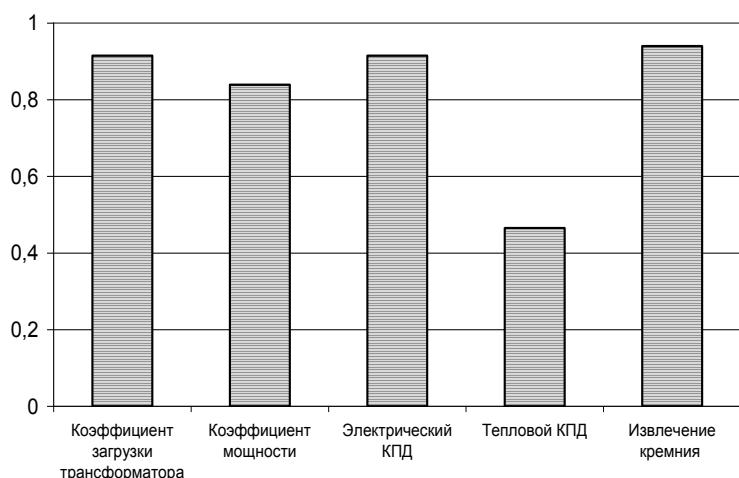


Рисунок 7 – Составляющие величины энерготехнологического критерия ферросплавной печи мощностью 22,5 МВ·А (15,96 МВт) без УПК при выплавке ферросилиция ФС45 (энерготехнологический критерий – 0,284)

8,6 МВт·ч/т и удовлетворительному варианту энерготехнологического критерия – от 0,272 до 0,293, при удельный расходе электроэнергии от 9,8 до 9,2 МВт·ч/т сплава.

Рассмотрены варианты выплавки различных марок сплава в печах мощностью 10,5–81 МВ·А. Изменение энерготехнологического критерия при выплавке ферросилиция ФС45–ФС90 в печах различной мощности приведено на Рисунке 8. Увеличение мощности трансформаторов печей приводит к ухудшению электрических параметров и при уменьшении извлечения кремния в итоге снижается энерготехнологический критерий. Печи небольшой и средней мощности до 22,5 МВ·А, благодаря сравнительно высоким значениям электрических параметров и теплового КПД, лучше приспособлены для выплавки высококремнистых ферросплавов и могут эффективно выплавлять широкий сортамент ферросилиция ФС20–ФС90. При мощности печей до 40 МВ·А эффективна выплавка ферросилиция ФС45–ФС75. Для печей мощностью до 81 МВ·А освоение технологии выплавки ферросплавов ограничивалось марками ФС45–ФС65.

Снижение удельного расхода электроэнергии при выплавке 75 %-ного ферросилиция (см. Рисунок 5) соответствует повышению энерготехнологического критерия печи по следующему выражению:

$$Sh = -0,035 W_{\phi c} + 0,615, \quad (11)$$

где:  $W_{\phi c}$  – удельный расход электроэнергии на выплавку ферросилиция, МВт·ч/т.

Для печей средней мощности хороший уровень работы соответствует диапазону значений энерготехнологического критерия от 0,300 до 0,314, при котором удельный расход электроэнергии составляет от 9,0 до

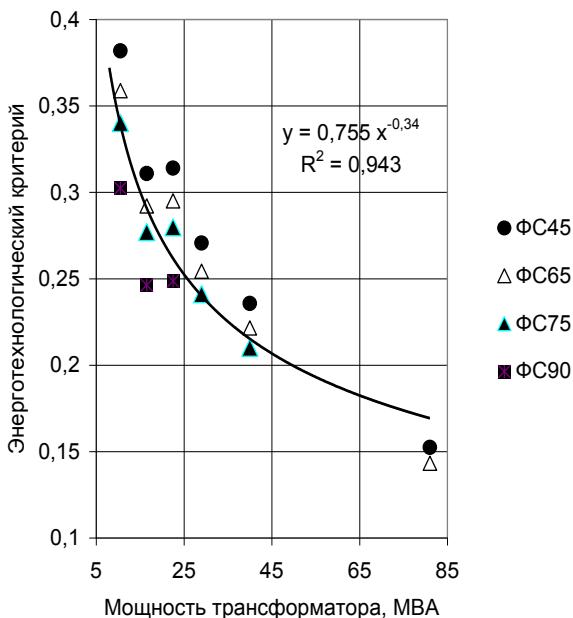


Рисунок 8 – Изменение энергетехнологического критерия печи при выплавке ферросилиция различных марок ФС45–ФС90 для 20 печей мощностью 10,5–81,0 МВ·А

от 7,5 до 81 МВ·А с круглой ванной и диаметром электродов 850–1900 мм. Отмечено, что энергетехнологический критерий снижается с увеличением мощности печей. Извлечение хрома составляло от 0,880 до 0,915, что в значительной мере зависит от качества рудного сырья и его подготовки. Основным фактором для хорошего извлечения является высокое содержание оксида хрома ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) в руде. При содержании в руде около 50 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  получается достаточно высокое извлечение. При снижении содержания  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в рудной части шихты и нарушениях технологии выплавки, извлечение хрома в сплав – ниже. Рассмотрено соотношение энергетехнологического критерия работы печи и удельного расхода электроэнергии при выплавке углеродистого феррохрома (Рисунок 10). Соответственно изменение энергетехнологического критерия ферросплавной печи и удельного расхода электроэнергии для выплавки углеродистого феррохрома соответствует выражению:

$$Sh = -0,074 W_{\phi x} + 0,570 , \quad (12)$$

где:  $W_{\phi x}$  – удельный расход электроэнергии на выплавку феррохрома, МВт·ч/т.

**Выплавка углеродистого феррохрома.** В качестве рудных материалов используется импортное и отечественное сырьё. Расход шихты значительный и приведен в разд. гл. 2. Удельный расход электроэнергии составляет 3600–4100 кВт·ч/т и более. Затраты на выплавку 1 т углеродистого феррохрома: хромовая руда – около 50–60 %; электроэнергия – 20–30 %; углеродистый восстановитель – 17–20 % и прочие. Структура составляющих величин комплексного параметра выплавки феррохрома для печи мощностью 23 МВ·А приведена на Рисунке 9.

Для выплавки углеродистого феррохрома, был проведен анализ энергетехнологических параметров эксплуатации 15 печей мощностью от 7,5 до 81 МВ·А с круглой ванной и диаметром электродов 850–1900 мм. Отмечено, что энергетехнологический критерий снижается с увеличением мощности печей. Извлечение хрома составляло от 0,880 до 0,915, что в значительной мере зависит от качества рудного сырья и его подготовки. Основным фактором для хорошего извлечения является высокое содержание оксида хрома ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) в руде. При содержании в руде около 50 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  получается достаточно высокое извлечение. При снижении содержания  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в рудной части шихты и нарушениях технологии выплавки, извлечение хрома в сплав – ниже. Рассмотрено соотношение энергетехнологического критерия работы печи и удельного расхода электроэнергии при выплавке углеродистого феррохрома (Рисунок 10). Соответственно изменение энергетехнологического критерия ферросплавной печи и удельного расхода электроэнергии для выплавки углеродистого феррохрома соответствует выражению:

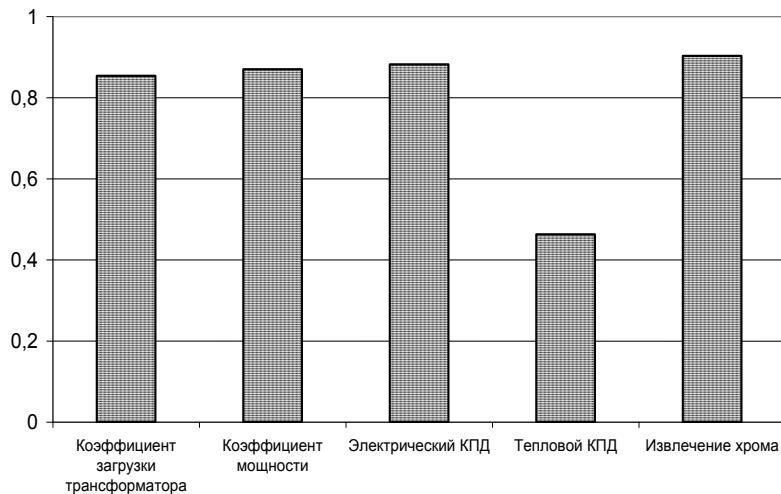


Рисунок 9 – Составляющие величины энергетехнологического критерия ферросплавной печи мощностью 23 МВ·А (17,01 МВт) при выплавке углеродистого феррохрома (энергетехнологический критерий – 0,294)

где:  $W_{\phi x}$  – удельный расход электроэнергии на выплавку феррохрома, МВт·ч/т.

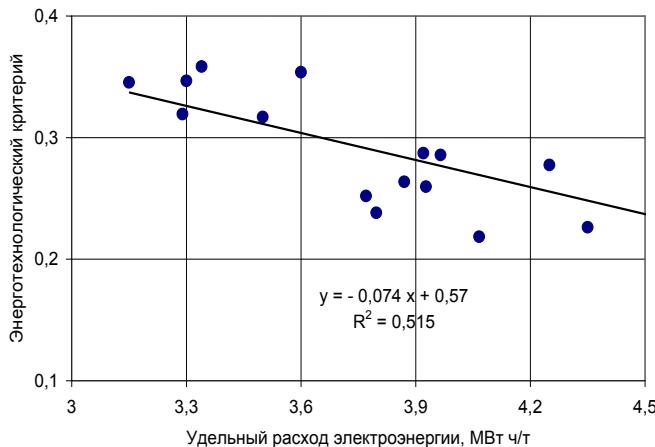


Рисунок 10 – Изменение энергетехнологического критерия ферросплавной печи от удельного расхода электроэнергии при выплавке углеродистого феррохрома на печах 7,5 – 81 МВ·А (коэффициент корреляции  $R = 0,718$ )

электроэнергии от 4,1 до 3,7 МВт·ч/т сплава.

**Выплавка углеродистого ферромарганца** в электропечах относится к энергозатратным и материалоёмким производствам. Удельный расход электроэнергии составляет 3900–4300 кВт·ч/т для флюсового способа и 3400–3850 кВт·ч/т для бесфлюсового способа выплавки. Структура составляющих величин энергетехнологического критерия печи мощностью 22,5 МВ·А для выплавки ферромарганца приведена на Рисунке 11.

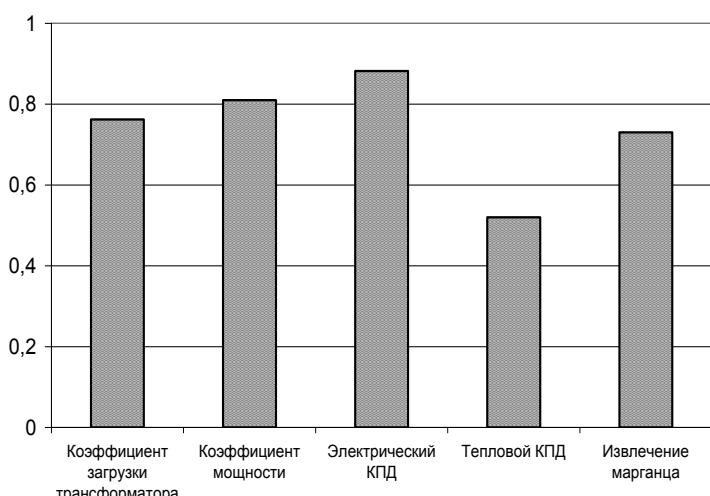


Рисунок 11 – Составляющие величины энергетехнологического критерия ферросплавной печи мощностью 22,5 МВ·А (13,8 МВт) при выплавке углеродистого ферромарганца (энергетехнологический критерий – 0,208)

61,1–64,9 кА; коэффициент мощности – 0,780–0,840. Отмечено высокое отношение I/U около 400 для печи мощностью 22,5 МВ·А.

С позиции энергетехнологического критерия проанализирована работа печей для выплавки чернового ферроникеля (многошлаковый процесс) и кремния технической чистоты (бесшлаковый процесс). Аналогично выплавке ферросилиция, феррохрома и ферромарганца получено, что улучшение в работе этих печей соответствует повышению

Также как при выплавке ферросилиция, большей величине энергетехнологического критерия соответствует меньший удельный расход электроэнергии, что характеризует уровень работы ферросплавной электропечи. Для печей средней мощности хороший уровень работы соответствует диапазону значений энергетехнологического критерия от 0,304 до 0,326 и удельном расходе от 3,6 до 3,3 МВт·ч/т. Удовлетворительному варианту соответствуют значения критерия от 0,267 до 0,289, при удельном расходе

Сравнивая значения энергетехнологического критерия работы печей мощностью 22,5 МВ·А (13,8 МВт) при выплавке углеродистого ферромарганца (0,208), с аналогичными по мощности печами при выплавке ферросилиция (0,284) и феррохрома (0,294), следует отметить, что данный процесс характеризуется самыми малыми значениями. Именно низкое активное сопротивление ванны не позволяет работать на более высоком рабочем напряжении при получении ферромарганца: рабочее напряжение – 150–164 В; сила тока электрода –

энерготехнологического критерия. Такая комплексная величина, как энерготехнологический критерий, может рассматриваться как основной элемент энергетического и технологического аудита ферросплавной печи для совершенствования и выявления эффективных режимов работы.

**В шестой главе** исследовано влияние подэлектродного промежутка и распада электродов на энерготехнологический критерий работы ферросплавной печи.

**Подэлектродный промежуток в ферросплавной электропечи.** Определение данной величины или расстояния от рабочего конца электрода до подины является сложной технической задачей. Из практики работы известно, что эта величина не превышает диаметра электрода и существенно влияет на технологию, электрический режим, тепловую работу ванны и может быть определена ориентировочно, так как электрод находится под слоем шихты, в реакционной плавильной зоне. При этом, если расстояние электрод – подина определяется в абсолютных, метрических величинах, то трудно выявить определённую зависимость. Однако, в соответствии с теорией подобия, при выражении этой величины через диаметр электрода соответствующей печи, выявляется закономерность, которая не зависит от мощности печи, размеров электрода и даже технологии процесса выплавки. Например, для получения ферросплавов выявлены следующие величины подэлектродного промежутка (в диаметрах электрода): 45%-ный ферросилиций – (0,6–0,9); 75%-ный ферросилиций – (0,6–0,8); 90%-ный ферросилиций – (0,5–0,7); технический кремний – (0,5–0,7); углеродистый феррохром – (0,7–1,0); ферросиликохром – (0,7–0,9); углеродистый ферромарганец – (0,6–0,9); ферросиликомарганец – (0,6–0,9). Относительная величина подэлектродного промежутка в основном соответствует диапазону (0,60–0,85) диаметра электрода. Для улучшения энерготехнологических параметров выплавки, с целью повышения сопротивления ванны, желательно увеличить подэлектродный промежуток.

Однако, увеличение подэлектродного промежутка свыше величины (0,60–0,85) диаметров электрода (при повышении рабочего напряжения) для печей с небольшим распадом электродов приводит: к уменьшению заглубления электродов в шихту; к повышенному улёту ведущего элемента; к снижению температуры сплава и трудности выпуска его из печи; к повышению удельного расхода электроэнергии. Такое явление происходит потому, что удаление электродов от подины печи, сверх определённой величины, вызывает резкое возрастание ответвления тока между электродами и приводит к неблагоприятному перераспределению электроэнергии в ванне ферросплавной печи.

Согласно выражению (4), в разд. гл. 3, критерий ЭП представлен в форме:  $R \cdot d_3 = \text{ЭП} \cdot \rho$ . При этом сопротивление ванны может быть выражено через длину и сечение токопровода, в диаметрах электрода печи (Рисунок 12). В результате получена другая форма критерия ЭП:

$$\text{ЭП} = \ell' / \ell'', \quad (13)$$

где:  $\ell'$  - коэффициент подобия длины путей тока;

$\ell''$  - коэффициент подобия сечения токопровода, плавильной зоны печи.

Поэтому повышение критерия ЭП и сопротивления ванны печи возможно при увеличении подэлектродного промежутка свыше обычных значений в условиях ограничивающих ответвление тока между электродами.

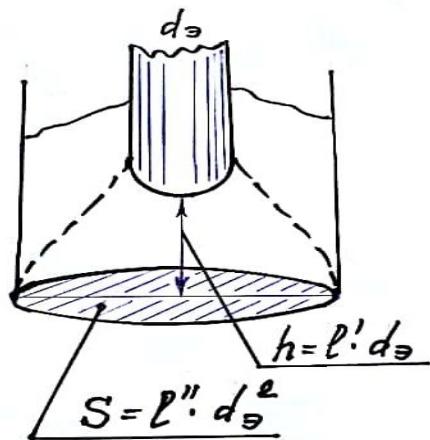


Рисунок 12 – Схема плавильной зоны в ферросплавной печи, размеры которой выражены через диаметр электрода ( $d_e$ ): подэлектродный промежуток:  $h = l' \cdot d_e$ ; сечение токопровода:  $S = l'' \cdot d_e^2$ , где:  $l'$  - коэффициент подобия длины путей тока;  $l''$  - коэффициент подобия сечения токопровода. При этом сопротивление ванны печи:  $R = (\rho \cdot h) / S$ , выражается также через удельное электросопротивление, длину и сечение токопровода

КПД (+ 4,2 %) и тепловой КПД печи (+ 21,0 %), при близкой степени извлечения кремния в сплав (0,921–0,919). При этом значительно возрастает энергетический критерий электропечи от 0,233 до 0,316 (+ 35,7 %). Данная технология показала принципиальную возможность повышения сопротивления ванны, напряжения и мощности в ванне печи в 2,5 раза (каждый показатель), без увеличения силы тока и диаметра электрода. При этом качественно меняется картина ввода дополнительной мощности в ванну ферросплавной печи: не за счёт увеличения силы тока, а благодаря повышению напряжения, что энергетически выгодно и более эффективно.

**Распад электродов и подэлектродный промежуток.** Рассмотрены данные по эксплуатации печей при выплавке 45 %-ного ферросилиция и было получено соотношение величин подэлектродного промежутка и распада электродов (Рисунок 13). При этом большему распаду электродов соответствует увеличенный подэлектродный промежуток. Средней величиной отношения диаметра распада к диаметру электрода считается – 2,5 или расстояние между центрами электродов – 2,18, в диаметрах электрода и принята как базовая величина печи.

Далее в результате, совмещения двух технических решений, таких как: 1) использование технологии получения ферросплавов с увеличенным подэлектродным промежутком; 2) применение электропечи со значительно увеличенным (в 2,1–2,8 раза) распадом электродов, была предложена, теоретически обоснована и опробована, принци-

пиально новая концепция выплавки ферросплавов, по варианту автономных, изолированных, плавильных зон под электродами в ванне печи (под слоем шихты) и выпуском расплава из-под каждого электрода.

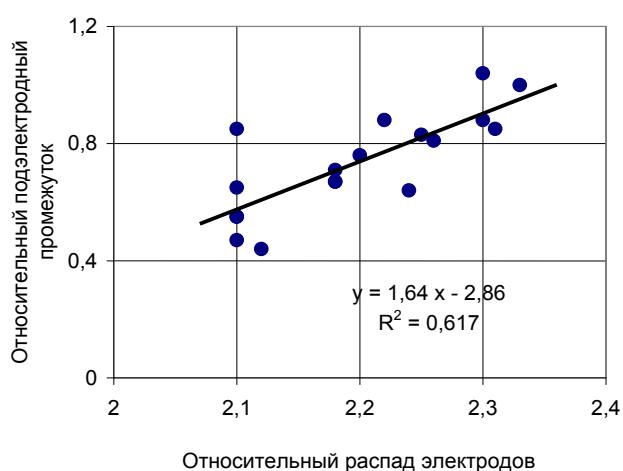


Рисунок 13 – Изменение распада электродов и подэлектродного промежутка, выраженных в диаметрах электрода, для промышленных печей мощностью 7,5–21 МВ·А при выплавке 45 %-ного ферросилиция (коэффициент корреляции  $R = 0,786$ )

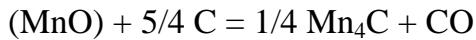
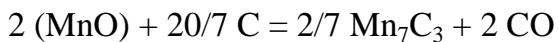
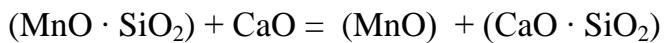
Для подтверждения результатов теоретических положений, данных моделирования и расчётов были проведены кампании выплавки 45 %-ного ферросилиция в опытных крупномасштабных печах, с используемой мощностью 150–352 кВ·А, с различным относительным распадом электродов ( $d_p/d_e$ : 2,18 – 3,0 – 4,5 – 6,0) и увеличенным подэлектродным промежутком, с целью улучшения энерготехнологических параметров.

Диаметр графитированных электродов составлял 150 мм. Размеры ванны по футеровке определялись величиной распада электродов. При выплавке с увеличенным подэлектродным промежутком глубина ванны была в 2,0–2,5 раза больше, по сравнению с глубиной ванны печи, имеющей базовый распад электродов.

В результате увеличения распада электродов от базовой величины 2,18 до (4,5–6,0) и подэлектродного промежутка от (0,6–0,8) до (3,5–3,6), которые выражены в диаметрах электрода, возрастает в 2,2–2,6 раза сопротивление ванны, полезное напряжение и мощность в ванне печи (каждый показатель) при выплавке ферросилиция. При этом улучшаются параметры: коэффициент мощности печи от 0,854 до 0,935–0,949, электрический КПД от 0,981 до 0,986–0,989 и тепловой КПД печи, без снижения извлечения кремния в сплав. Значительно увеличивается энерготехнологический критерий работы ферросплавной электропечи на 37,7–47,8 % от 0,196 до 0,270–0,290.

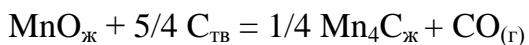
В дальнейшем по такой концепции выплавки в качестве шлакового процесса исследовали получение углеродистого ферромарганца. В результате показано, что при выплавке ферромарганца с увеличением распада электродов от 2,18 до (4,5–6,0) и подэлектродного промежутка от (0,6–0,8) до (2,4–2,6), которые выражены в диаметрах электрода, возрастает в 2,1–2,7 раза сопротивление ванны, полезное напряжение и мощность в ванне печи (каждый показатель), без уменьшения заглубления электродов в шихту. При этом также улучшились коэффициент мощности, электрический и тепловой КПД печи.

При выплавке углеродистого ферромарганца флюсовым способом (с основностью шлака 1,1–1,3), восстановление марганца в общем происходит в комплексе как до карбива  $Mn_7C_3$  так и до карбида  $Mn_{23}C_6$  ( $Mn_4C$ ) по следующей схеме:



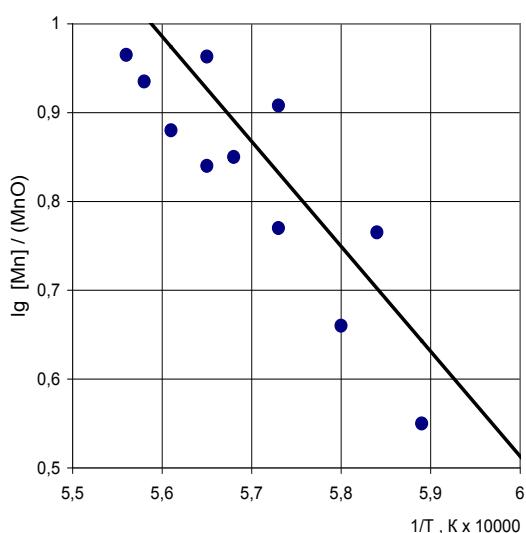
При выплавке ферромарганца с увеличенными значениями подэлектродного промежутка и распада электродов возможна работа печи с повышенной основностью шлака 1,60–1,68, из-за дополнительной мощности в ванне печи для лучшего извлечения марганца в сплав. Повышение основности шлака увеличило температуру его плавления и соответственно температуру в реакционной плавильной зоне. В результате, отмечено повышение извлечения марганца в сплав и восстановление его до карбида  $Mn_4C$  ( $Mn_{23}C_6$ ). Данное обстоятельство способствовало лучшему переходу в сплав не только марганца, но и кремния, что подтверждают данные термодинамического анализа (Рисунок 14). При этом химический состав углеродистого ферромарганца имел пониженное содержание углерода 4,9–5,4 % С и повышенное содержание кремния 4,3–5,0 % Si и более. Таким образом, более эффективное использование марганца, приводит не только к лучшему распределению ведущего элемента, но и к повышенному переходу в сплав кремния.

### Распределение марганца в сплав (а)

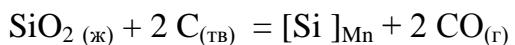


$$\Delta G^\circ \Sigma = 219757 - 140,17 T, \text{Дж/моль}$$

$$\lg L_{Mn} = (-11317/T) + 7,33$$

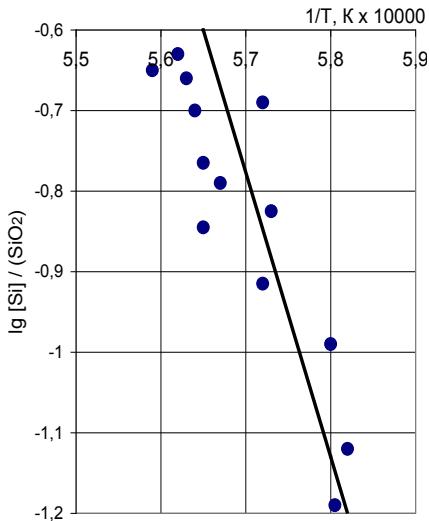


### Распределение кремния в сплав (б)



$$\Delta G^\circ \Sigma = 699129 - 369,20 T, \text{Дж/моль}$$

$$\lg L_{Si} = (-35255/T) + 19,32$$



В качестве подтверждения выводов предложенной концепции получения ферросплавов аналогичные результаты были получены при проведении кампаний выплавки ферросилиция в условиях Аксусского завода ферросплавов. Выплавку 45 %-ном ферросилиции проводили в печах с увеличенным распадом электродов – 5,6 и базовым вариантом – 2,18 диаметров электрода. Подэлектродной промежуток (электрод – подина) составлял в первом варианте (2,27–2,42) и во втором традиционном варианте выплавки был (среднее – 0,83) в диаметрах электрода соответственно.

В результате выплавки при увеличенном распаде электродов сопротивление ванны, напряжение на электродах и мощность в печи возросли в 2 раза (каждый показатель). Удельный расход электроэнергии снизился на 16,7 % (от 7487 до 6237 кВт·ч/т). Производительность выросла до 2,7 т/сут, против 1,11 т/сут при традиционных величинах распада электродов и подэлектродного промежутка. Значительно увеличился тепловой КПД, коэффициент мощности, электрический КПД и энерготехнологический критерий работы ферросплавной печи от 0,272 до 0,353 (+ 29,8 %), что приведено на Рисунке 15.

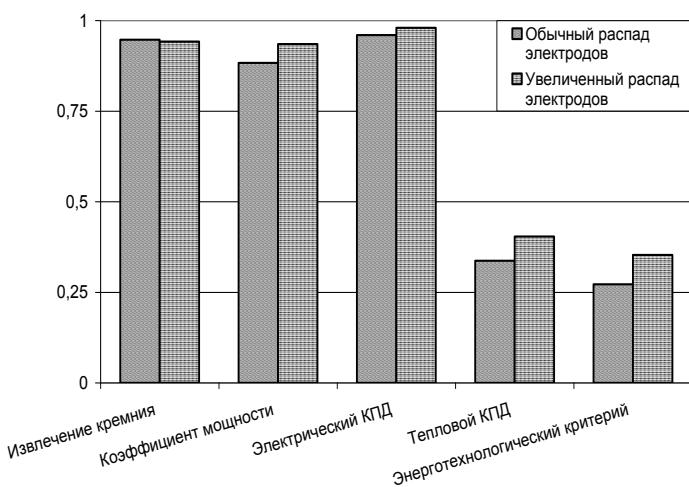


Рисунок 15 – Энерготехнологические параметры выплавки ферросилиция в печах с обычными значениями распада электродов (2,18) и подэлектродного промежутка (0,76–0,91), по сравнению с выплавкой с увеличенными значениями распада электродов (5,6) и подэлектродного промежутка (2,27–2,42), выраженных в диаметрах электрода

На основании данных о распаде электродов и величине подэлектродного промежутка при выплавке ферросилиция в промышленных печах, полупромышленной и опытной выплавки при статистической обработке результатов, получена зависимость относительных величин подэлектродного промежутка и распада электродов. При традиционных величинах распада электродов (2,10–2,30) и подэлектродного промежутка (0,60–0,85) в диаметрах электрода, получено выражение (14). Для увеличенных значений распада электродов (до 6  $d_3$ ) и подэлектродного промежутка до (3,5–3,6) диаметров электрода, выражение (15):

$$h/d_3 = 1,64 \cdot d_p/d_3 - 2,86, \quad R = 0,785 \quad (14)$$

$$h/d_3 = 0,75 \cdot d_p/d_3 - 0,90, \quad R = 0,951 \quad (15)$$

где:  $h/d_3$  – относительная величина подэлектродного промежутка;

$d_p/d_3$  – относительная величина распада электродов, в диаметрах электрода.

Разработана и опробована технология выплавки ферросилиция с дифференцированным способом загрузки шихты в печь, которая имеет увеличенный распад электродов. Создание между электродами зоны малоэлектропроводной шихты (из отходов кварцитовой мелочи), уменьшает токи шихтовой проводимости (электрод – электрод) при

выплавке 45%-ного ферросилиция. Дополнительно возрастает: сопротивление ванны, полезное напряжение и мощность в ванне печи в 2,8–2,9 раза; коэффициент мощности от 0,854 до 0,951–0,953 и электрический КПД от 0,981 до 0,986–0,988, по сравнению с обычным способом загрузки и выплавки в печи с традиционным распадом электродов. В результате энерготехнологический критерий увеличился от 0,197 до 0,310–0,322 (+57,8–64,0 %), относительно базового варианта.

**В седьмой главе** приведены оценка технических решений с помощью энерготехнологического критерия работы ферросплавной печи и практические рекомендации.

**Анализ технических решений выплавки ферросплавов.** Рассмотрены технические решения и разработки в области электрометаллургии ферросплавов, которые были отмечены как перспективные в разд. гл. 1. Проведена оценка эффективности по изменению энерготехнологического критерия по сравнению с базовым вариантом выплавки.

Наибольшее увеличение энерготехнологического критерия получено при выплавке углеродистого ферромарганца в плазменной шахтной печи типа доменной (40,0–48,3 %) по сравнению с базовым вариантом (п. 8, Таблица 3). Сочетание таких факторов печи, как большой тепловой КПД и высокотемпературный плазменный нагрев, способствовали лучшему извлечению марганца в сплав и значительному энерготехнологическому критерию.

Таблица 3 – Сравнение эффективности технических решений выплавки ферросплавов

п/п	Техническое решение	Изменение критерия, %
1.	Применение полуокса и коксика при выплавке ферросилиция ФС45 в печи 22,5 МВ·А (16,2 МВт)	+ 19,8
2.	Применение бурого угля в смеси с коксиком для выплавки ФС45 в печи 81 МВ·А (57 МВт)	+ 17,3
3.	Замена части коксика на антрацит при выплавке углеродистого ферромарганца ФМн78 в печи 63 МВ·А (31 МВт)	+ 0,3
4.	Выплавка ФС65 в печи 27,6 МВ·А (22,3 МВт) с разряжением под сводом (– 3 ... – 8) Па	+ 11,2
5.	Выплавка ферросилиция ФС45 в печи 24 МВ·А (17,1МВт) на пониженной частоте тока 12,5 Гц	+ 0,6
6.	Выплавка ФС45 с увеличенным распадом электродов и подэлектродным промежутком в полупромышленных условиях и в крупномасштабных опытных печах	+ 29,8 до (37,7–47,8)
7.	Выплавка углеродистого феррохрома (53 % Cr) в плазменной печи 14 МВт (20 МВ·А) с полым электродом	+ (32,8–37,3)
8.	Выплавка углеродистого ферромарганца в плазменной печи шахтного типа с плазматронами мощностью 9 МВт (6 x 1,5 МВт)	+ (40,0–48,3)

Технология получения углеродистого феррохрома (с открытой дугой) в среднешахтной печи с полым графитовым электродом и вдуванием плазмообразующего газа (п.7, Таблица 3) существенно увеличила энерготехнологический критерий на 32,8–37,3 %.

Выплавка ферросплавов с увеличенным подэлектродным промежутком и распадом электродов (на переменном токе) имеет большой потенциал по повышению активного

сопротивления ванны, напряжения и мощности печи в 2,0–2,6 раза, без увеличения силы тока электродов и их диаметров (п. 6). Энерготехнологический критерий повышается на 29,8 % и до 37,7–47,8 %, из-за улучшения коэффициента мощности, теплового и электрического КПД. Такая предложенная концепция выплавки ферросплавов переводит агрегат в разряд среднешахтных печей.

При частичной замене коксила на другие восстановители при выплавке ферросилиции наилучшие результаты получены при использовании полукокса (п. 1), бурых углей (п. 2) энерготехнологический критерий увеличился на 19,8 и 17,3 % соответственно. Использование антрацита при выплавке ферромарганца, практически не отразилось на энерготехнологическом критерии (п. 3). Выплавка ферросилиции с разряжением под сводом закрытой печи (п. 4, Таблица 3), повышает извлечение кремния в сплав, активное сопротивление ванны, мощность в печи, улучшает коэффициент мощности, электрический КПД и соответственно энерготехнологический критерий на 11,2 %.

Выплавка ферросилиции ФС45 в печи на токе пониженной частоты 12,5 Гц (п. 5, Таблица 3), по сравнению с выплавкой на частоте тока 50 Гц, показала увеличение коэффициента мощности печи. При этом снизилась активная мощность в ванне. Изменение комплексного параметра составило (+0,6 %). Отмечено, что выплавка на постоянном токе углеродистого феррохрома в печи (на уровне 45–50 МВт), при номинальной мощности 72 МВт (110 МВ·А), и выплавка кремния в печи 6,4 МВт (9 МВ·А), пока характеризуется значениями энерготехнологического критерия несколько ниже, чем для печей переменного тока. Данное обстоятельство указывает на то, что уровень таких технологий выплавки, конструкции печей и особенно системы источников питания постоянного тока необходимо совершенствовать.

**Энерготехнологический критерий и производительность печи.** Отмечено, что для ферросплавных печей с увеличением мощности, снижается удельная суточная производительность агрегата (т/сут) на 1 МВ·А установленной мощности трансформатора. При этом получено, что удельная производительность печи как при выплавке ферросилиции (бесшлаковый процесс), так и при выплавке углеродистого феррохрома (шлаковый процесс) возрастает при повышении значений энерготехнологического критерия работы ферросплавной печи (Рисунок 16) и имеет прямолинейную зависимость, выражения (16) и (17) соответственно:

$$\text{Пр}_{\text{уд.ФС75}} = 5,23 \cdot \text{Sh}_{\text{ФС75}} + 0,41; \quad (16)$$

$$\text{Пр}_{\text{уд.ФХ}} = 18,27 \cdot \text{Sh}_{\text{ФХ}} - 0,58, \quad (17)$$

где: Пр<sub>уд.ФС75</sub> – удельная производительность печи на 1 МВ·А при выплавке 75%-ного ферросилиции, т/сут; Sh<sub>ФС75</sub> – энерготехнологический критерий печи при выплавке 75 %-ного ферросилиции; Пр<sub>уд.ФХ</sub> – удельная производительность печи на 1 МВ·А при выплавке углеродистого феррохрома, т/сут; Sh<sub>ФХ</sub> – энерготехнологический критерий печи при выплавке углеродистого феррохрома.

**Энерготехнологический критерий и себестоимость сплава.** Для энергоёмкого процесса выплавки ферросплавов, доля электроэнергии в цеховой себестоимости 1 т массовых ферросплавов достаточно высока и составляет 30–55 % и выше. При условии постоянства стоимости руды и углеродистого восстановителя, на основании уравнений (11) и (12), и использовании данных о доли удельного расхода электроэнергии, были получены зависимости энерготехнологического критерия работы печи и цеховой себестоимости 1 т ферросплавов.

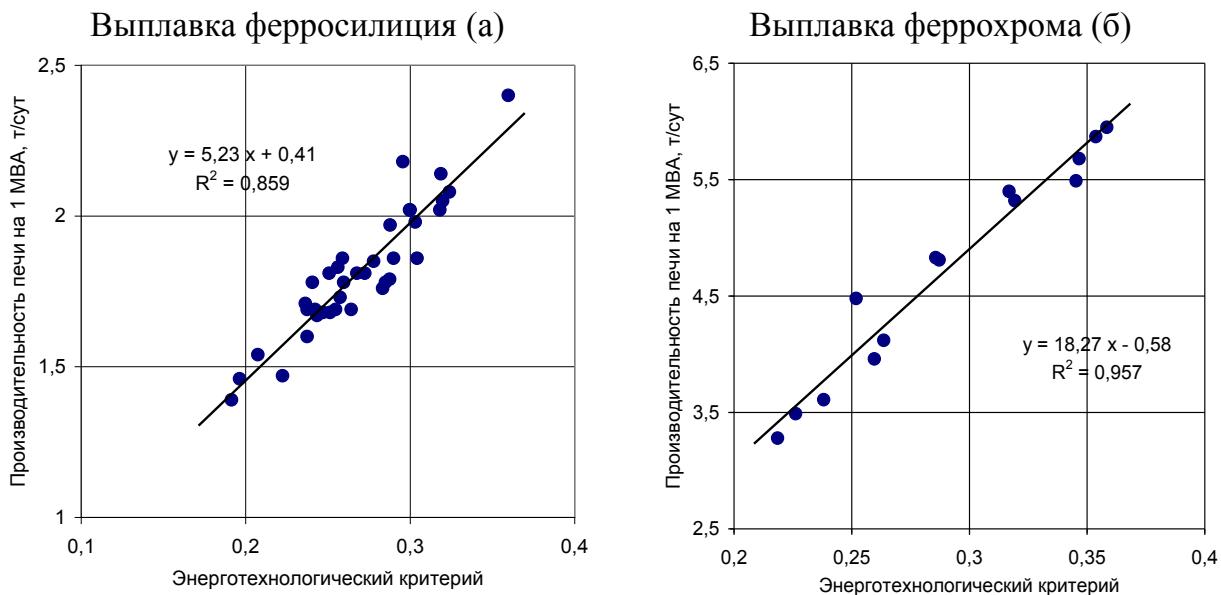


Рисунок 16 – Повышение удельной производительности печей на 1 МВ·А установленной мощности трансформаторов при увеличении энерготехнологического критерия работы ферросплавной электропечи при выплавке 75%-ного ферросилиция (а) и углеродистого феррохрома (б)

Следовательно, данная зависимость для 75 %-ного ферросилиция имеет следующий вид:

$$Sh_{\Phi C75} = -0,035 \cdot C/C_{\Phi C75} \cdot K_{w\Phi C75} + 0,615 , \quad (18)$$

где:  $C/C_{\Phi C75}$  – цеховая себестоимость 1 т 75%-ного ферросилиция;

$K_{w\Phi C75}$  – доля затрат электроэнергии в себестоимости 1 т ФС75 (~ 50 %).

Аналогичным образом, получено выражение (19) для углеродистого феррохрома:

$$Sh_{\Phi X} = -0,074 \cdot C/C_{\Phi X} \cdot K_{w\Phi X} + 0,570 , \quad (19)$$

где:  $C/C_{\Phi X}$  – цеховая себестоимость 1 т углеродистого феррохрома;

$K_{w\Phi X}$  – доля затрат электроэнергии в себестоимости 1 т феррохрома (~ 30 %).

Таким образом, при рассмотренных допущениях, получено, что при увеличении энерготехнологического критерия ферросплавной печи, цеховая себестоимость сплава снижается, как для выплавки ферросилиция, так и для выплавки углеродистого феррохрома.

**Энерготехнологический критерий и энергоаудит печей.** Энерготехнологический критерий, как комплексный параметр, был использован в качестве основы энергоаудита для двух ферросплавных печей мощностью 29 МВ·А завода «Кузнецкие ферросплавы», которые выплавляли 75 %-ный ферросилиций. Применение на одной из печей увеличенного диаметра распада электродов 3,4 м, вместо 3,0 м, а также углеродистых восстановителей с повышенным удельным электросопротивлением в виде полукокса, увеличило энерготехнологический критерий ферросплавной печи с 0,203 до 0,258. В этом случае получено снижение удельного расхода электроэнергии на 615 кВт·ч/т или на 6,8 %.

Поэтому данная методика определения эффективности выплавки ферросплавов в электропечах может быть использована не только для различных видов восстановителей в шихте, но и для применения новых типов рудного сырья. Такими рудными материалами могут быть кварциты, хромовые и марганцевые руды новых источников сырья и месторождений. В результате сравнения различных технологий выплавки на основе энерготехнологического критерия работы ферросплавной электропечи как на переменном токе и так на по постоянном токе, показаны преимущества и недостатки технических решений в электрометаллургии ферросплавов и кремния для повышения эффективности производства.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено комплексное исследование и определены закономерности энерготехнологических параметров выплавки для улучшения показателей работы ферросплавных электропечей. Научно обоснован ряд предложенных технических решений для повышения эффективности в сфере электрометаллургии ферросплавов.

## Основные выводы по результатам работы

1. На основе анализа показателей эксплуатации отечественных и зарубежных ферросплавных электропечей установлено, что увеличение мощности печных трансформаторов приводит к ухудшению энерготехнологических параметров работы печей и нерациональному использованию материалов и электроэнергии. При повышении мощности ферросплавных печей от 10,5 до 105 МВ·А диаметр самообжигающихся электродов увеличился с 900 до 1800–2000 мм, то есть в 2,0–2,2 раза. Сила тока электрода возросла с 32–37 кА до 160 кА и более, то есть в 4,3–5,0 раз, а рабочее напряжение увеличилось не столь значительно – со 130 В до 230–300 В или в 1,8–2,3 раза. В результате снизились параметры печей: коэффициент мощности, электрический и тепловой КПД, существенно увеличился расход цветных металлов для изготовления токоподвода, что потребовало разработки новых технических решений для повышения эффективности работы ферросплавных печей.

Показано, что с повышением мощности печей увеличивается разрыв между активной мощностью в ванне и установленной мощностью печных трансформаторов, что отрицательно влияет на производительность ферросплавных электропечей.

2. Основной причиной ухудшения показателей работы электропечей при повышении мощности является снижение активного сопротивления ванны. Выявлено, что энергетико-технологические параметры выплавки несколько улучшаются в результате применения углеродистых восстановителей (полукоксы, газовые угли и другие), которые имеют повышенное удельное электросопротивление. Однако эффект от увеличения активного сопротивления ванны не превышает 5–10 %.

3. На основе комплексного анализа параметров выплавки предложена и исследована безразмерная критериальная величина – энергетико-технологический критерий работы ферросплавной печи. Данная величина в комплексе характеризует технологию углеродотермического процесса получения ферросплавов, электрический режим и тепловую работу печи, а также определяет в целом эффективность процесса выплавки ферросплавов.

4. Впервые установлено, что при работе печи бесшлаковым процессом (выплавка ферросилиция) и шлаковым процессом (выплавка углеродистого феррохрома) повышение величины энергетико-технологического критерия работы печи соответствует снижению удельного расхода электроэнергии.

5. Показано, что повышение мощности трансформаторов ферросплавных печей традиционных конструкций сопровождается снижением величины энергетико-технологического критерия. С учётом энергетико-технологического критерия для улучшения работы печей основными факторами являются: извлечение ведущего элемента в сплав, тепловой КПД печи, коэффициент мощности печи, электрический КПД и коэффициент загрузки печного трансформатора.

С позиции энергетико-технологического критерия работы печи выявлены наиболее эффективные варианты технологии выплавки углеродотермическим процессом: ферросилиция; углеродистого феррохрома; углеродистого ферромарганца; чернового ферроникеля и кремния технической чистоты.

6. Впервые предложена, теоретически обоснована и опробована в опытных крупномасштабных шахтных электропечах технология выплавки ферросплавов с увеличенным подэлектродным промежутком от традиционной величины (0,6–0,8) диаметра электрода до максимального значения 6,0 диаметров электрода, при увеличении глубины ванны печи. Она показала принципиальную возможность повышения сопротивления ванны, напряжения и мощности в печи в 2,5 раза каждого показателя при улучшении энергетико-технологических параметров выплавки 45%-ного ферросилиция.

Установлено, что при этом качественно меняются условия ввода дополнительной мощности в ванну – не за счёт увеличения силы тока и, соответственно, увеличения диаметра электролов, а благодаря повышению рабочего напряжения, что энергетически более выгодно и эффективно. В результате при получении стандартного ферросплава значительно (+35,7 %) возрастает энергетико-технологический критерий работы печи.

7. Предложена, обоснована и прошла полупромышленную проверку принципиально новая концепция выплавки ферросплавов углеродотермическим процессом по варианту автономных изолированных плавильных зон в слое шихты под электродами. Сущ-

ность этой концепции заключается в совмещении технологии выплавки с увеличенным подэлектродным промежутком в электропечи, которая имеет увеличенный распад электродов и более глубокую ванну, что позволяет значительно повысить сопротивление ванны и улучшить энерготехнологические параметры выплавки. При этом выпуск расплава производится отдельно из-под каждого электрода.

8. Установлено, что при выплавке ферросилиция одновременное увеличение распада электродов от 2,18 до (4,5–6,0) и подэлектродного промежутка от (0,6–0,8) до (3,5–3,6) в диаметрах электрода, значительно (в 2,2–2,6 раза каждый показатель) возрастают сопротивление ванны, полезное напряжение и мощность, выделяемая в ванне печи. При этом улучшаются коэффициент мощности печи, электрический и тепловой КПД печи, а энерготехнологический критерий работы печи увеличивается на (37,7–47,8 %) – от 0,196 до 0,270–0,290. Аналогичное повышение эффективности работы печи при улучшении энерготехнологических параметров получено и при выплавке углеродистого ферромарганца. При этом наряду с лучшим распределением марганца в сплав отмечено повышение содержание кремния в ферромарганце.

9. Предложенная концепция получения ферросплавов по варианту с автономными плавильными зонами подтверждена положительными результатами полупромышленной выплавки ферросилиция в условиях Аксусского завода ферросплавов. При выплавке 45 %-ного ферросилиция в результате увеличения распада электродов и подэлектродного промежутка в 2 раза возросло сопротивление ванны, напряжение и производительность печи. Энерготехнологический критерий работы печи улучшился на 29,8 % (от 0,272 до 0,353), а удельный расход электроэнергии на 1 базовую тонну сплава снизился на 16,7 %.

10. Разработана и в опытном масштабе опробована технология выплавки ферросилиция с дифференцированным способом загрузки шихты в печь с увеличенным распадом электродов. Благодаря существенному уменьшению межэлектродных токов шихтовой проводимости «электрод–электрод» и созданию изолированных плавильных зон под электродами разработанная технология дополнительно повышает активное сопротивление ванны, напряжение и мощность в ванне печи в 2,8–2,9 раза. По сравнению с обычным способом загрузки в печь с традиционным распадом электродов, при выплавке 45%-ного ферросилиция увеличились коэффициент мощности, электрический и тепловой КПД печи. В результате энерготехнологический критерий печи увеличился на 57,8–64,0 % – от 0,197 до 0,310–0,322.

11. Разработана методика оценки эффективности работы печи, в которой энерготехнологический критерий рассматривается как фактор энергоресурсосбережения. Энерготехнологический критерий был использован в качестве основы энергоаудита двух ферросплавных печей завода «Кузнецкие ферросплавы» мощностью по 29 МВ·А каждая. Для этого при выплавке 75 %-ного ферросилиция была использована методика сравнения работы печей в разных условиях. Применение на одной из печей увеличенного диаметра распада электродов 3,4 м, вместо 3,0 м, а также использование полукоксов, угле-

родистых восстановителей с повышенным удельным электросопротивлением, увеличило энерготехнологический критерий ферросплавной печи (+27,1 %) от 0,203 до 0,258. При этом отмечено снижение удельного расхода электроэнергии на 6,8 %.

12. На основе анализа относительных величин подэлектродного промежутка и распада электродов промышленных печей, опытных и полупромышленных вариантов выплавки с увеличенным и традиционным распадом электродов впервые получена статистическая зависимость подэлектродного промежутка от распада электродов печи.

13. Установлено, что увеличение энерготехнологического критерия работы ферросплавной электропечи повышает удельную производительность промышленной печи (т/сут) на 1 МВ·А мощности трансформатора. Показано, что повышение энерготехнологического критерия благоприятно отражается на снижении удельного расхода электроэнергии, а также на снижении себестоимости 1 т ферросилиция и углеродистого феррохрома.

14. На основе анализа энерготехнологического критерия работы печи разработана новая универсальная методика определения эффективности выплавки ферросплавов в электропечах различных конструкций и технологий. Проведена оценка эффективности выплавки в печах переменного тока промышленной частоты, в печах с пониженной частотой тока, в печах постоянного тока с открытой и закрытой дугой, а также в плазменных электропечах.

#### *Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы*

Учитывая положительные результаты теоретических положений, лабораторных, полупромышленных и промышленных исследований, предложенных методов повышения эффективности электропечей, следует рекомендовать их использование в электрометаллургии ферросплавов, в том числе при применении различных углеродистых восстановителей, рудного сырья и разработке новых типов плавильных агрегатов.

#### **Список основных опубликованных работ по теме диссертации**

##### **Монография**

Шкирмонтов А.П. Энерготехнологические параметры выплавки ферросплавов в электропечах. – М.: Издательский дом «МИСиС». – 2018. – 216 с.

##### **Статьи, опубликованные в рецензируемых журналах Перечня ВАК**

1. Шкирмонтов А.П. Разработка теоретических основ и энерготехнологических параметров выплавки ферросплавов с увеличенным подэлектродным промежутком // Металлург. – 2009. – № 5. – С. 57 – 62.

Shkirmontov A.P. Establishing the theoretical foundations and energy parameters for the production of ferroalloys with a larger-than-normal gap under the electrode // Metallurgist. – 2009. – V. 53. – N 5-6. – P. 300 – 308. *Scopus, Q3*.

2. Шкирмонтов А.П. Теоретические основы и энерготехнологические параметры выплавки ферросилиция с увеличенным распадом электродов и подэлектродным промежутком // Металлург. – 2009. – № 6. – С. 68 – 72.

Shkirmontov A.P. Theoretical principles and energy parameters in ferrosilicon production with an increase in the electrode spacing and the distance from the electrodes to the bath // Metallurgist. – 2009. – V. 53. – N 5–6. – P. 373 – 379. *Scopus, Q3*.

3. Шкирмонтов А.П. Разработка энерготехнологических параметров выплавки ферросилиция с увеличенным подэлектродным промежутком. Ограничение токов «электрод-электрод» // Металлург. – 2009. – № 7. – С. 62 – 64.

Shkirmontov A.P. Determination of the energy parameters for the smelting of ferrosilicon with an increased electrode gap. Limitation on the electrode – electrode current // Metallurgist. – 2009. – V. 53. – N 7-8. – P. 434 – 438. *Scopus, Q3*.

4. Шкирмонтов А.П. Разработка энерготехнологических параметров выплавки марганцевых ферросплавов с увеличенным подэлектродным промежутком и распадом электродов // Металлург. – 2009. – № 8. – С. 76 – 79.

Shkirmontov A.P. Determination of the energy parameters for the smelting of manganese ferroalloys with increases in the electrode gap and electrode spacing // Metallurgist.–2009.– V. 53.– N 7-8. – P.512 – 517. *Scopus, Q3*.

5. Шкирмонтов А.П. Энерготехнологические параметры выплавки ферросилиция с увеличенными значениями подэлектродного промежутка и распада электродов в заводских условиях // Металлург.– 2009.– № 10.– С. 64 – 67.

Shkirmontov A.P. Energy parameters of ferrosilicon production with larger-than-normal values for the electrode gap and electrode spacing under factory conditions // Metallurgist.– 2009.– V. 53.– N 9–10.– P. 642 – 647. *Scopus, Q3*.

6. Шкирмонтов А.П. Оценка энерготехнологических параметров ферросплавных рудо-восстановительных печей // Промышленная энергетика. – 2010. – № 12. – С. 20 – 23.

7. Шкирмонтов А.П. Сравнение параметров печей для выплавки ферросилиция с различным распадом электродов // Металлург. – 2011. – № 4. – С. 61 – 64.

Shkirmontov A.P. Comparison of the parameters of ferrosilicon-smelting furnaces with different electrode spacings // Metallurgist.– 2011.– V. 55.– N 3 – 4. – P. 266–270. *Scopus, Q3*.

8. Шкирмонтов А.П. Анализ составляющих величин энерготехнологического критерия работы ферросплавной электропечи // Электрометаллургия.– 2011.– № 8.– С. 30 – 33.

9. Шкирмонтов А.П. Взаимосвязь распада электродов и величины подэлектродного промежутка в ферросплавной печи // Сталь. 2012. – № 3. – С. 26 – 29.

Shkirmontov A.P. Relation between the Electrode Spacing and the Electrode Height in Ferroalloy Furnaces // Steel in Translation. – 2012.– V. 42. – № 3. – P. 249 – 251. *Scopus, Q2*.

10. Шкирмонтов А.П. Роль подэлектродного промежутка в ферросплавной печи в улучшении энерготехнологических параметров выплавки углеродтермическим процессом // Электрометаллургия. – 2017. – № 6. – С. 24 – 31.

11. Шкирмонтов А.П. Влияние подэлектродного промежутка и распада электродов на энерготехнологический критерий работы ферросплавной электропечи // Электрометаллургия. – 2017. – № 8. – С. 33 – 40.
  12. Шкирмонтов А.П. Энерготехнологический критерий работы ферросплавной печи при выплавке углеродистого феррохрома // Электрометаллургия. – 2017. – № 11. – С. 32 – 38.
  13. Шкирмонтов А.П. Энерготехнологическая эффективность работы ферросплавных электропечей // Сталь. – 2018. – № 6. – С. 16 – 20.
- Shkirmontov A.P. Energy–Technology Efficiency of Ferroalloy Electrofurnaces // Steel in Translation. – 2018. – V. 48. – № 6. – P. 376 – 380. *Scopus, Q2*.
14. Шкирмонтов А.П. Выплавка ферросилиция с позиции энерготехнологического критерия работы ферросплавной электропечи // Бюллетень НТИ Черная металлургия. – 2018. – № 8. – С. 43 – 49.
  15. Шкирмонтов А.П. Изменение энерготехнологических параметров выплавки ферросплавов при увеличении мощности электропечей // Электрометаллургия. – 2019. – № 1. – С. 18–28.
  16. Шкирмонтов А.П. Комплексный энерготехнологический параметр работы ферросплавной электропечи / А.П. Шкирмонтов, В.Е. Рошин // Сталь. – 2020. – № 2. – С. 20 – 25.
  17. Шкирмонтов А.П. Технико-экономические показатели выплавки и энерготехнологический критерий работы ферросплавной электропечи / А.П. Шкирмонтов, В.Е. Рошин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия. Металлургия. – 2020. – Т. 20. – № 2. – С. 33 – 42.

*Журналы Перечня изданий ВАК в прежней редакции за период  
09.02.2010 г. по 30.11.2015 г.*

18. Шкирмонтов А.П. Определение комплекса параметров для получения энерготехнологического критерия работы ферросплавной электропечи // Главный энергетик. – 2010. – № 5. – С. 44 – 50.
19. Шкирмонтов А.П. Расчёт параметров электропечи для выплавки ферросилиция с увеличенным распадом электродов на примере реконструкции типовой печи // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2010. – № 4. – С. 65 – 68.
20. Шкирмонтов А.П. Изменение индуктивного сопротивления ванны и коэффициента мощности с увеличением распада электродов ферросплавной печи // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2010. – № 9. – С. 48 – 51.
21. Шкирмонтов А.П. Увеличение диаметра электродов и массы оборудования с ростом мощности ферросплавных печей // Главный механик. – 2010. – № 10. – С. 21 – 24.
22. Шкирмонтов А.П. Влияние диаметра электродов на электросопротивление ванны ферросплавной печи // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2011. – № 4. – С. 42 – 49.

23. Шкирмонтов А.П. Определение энерготехнологического критерия работы печи для выплавки технического кремния // Главный энергетик. – 2011. – № 9. – С. 46 – 49.
24. Шкирмонтов А.П. Сравнительные параметры выплавки ферросплавов и кремния в печах переменного и постоянного тока // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2011. – № 12. – С. 13 – 16.
25. Шкирмонтов А.П. Увеличение распада электродов и различные типы ванн ферросплавных печей // Главный энергетик. – 2012. – № 5. – С. 29 – 35.
26. Шкирмонтов А.П. Энерготехнологические параметры, структура и процессы в реакционной зоне электропечи при выплавке ферромарганца // Главный энергетик. – 2014. – № 6. – С. 38 – 48.
27. Шкирмонтов А.П. Энерготехнологические параметры работы ферросплавных электропечей // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2015. – № 10. – С. 44 – 58.
28. Шкирмонтов А.П. Анализ энерготехнологических параметров работы ферросплавной электропечи при выплавке ферросилиция // Главный энергетик. – 2015. – № 11/12. – С. 21 – 24.

#### **Патентная информация и другие правоустанавливающие документы**

29. А. с. № 825664, МПК C22B 4/00. Способ загрузки материалов в руднотермическую электропечь / А.С. Микулинский, А.П. Шкирмонтов, А.Н. Попов, Л.А. Рязанцев. – № 2674867/22-07; заявл. 18.10.78; опубл. 10.05.81. Бюл. № 16.
30. А. с. № 870895, МПК F27D 1/00. Руднотермическая электропечь / А.С. Микулинский, А.П. Шкирмонтов. – № 2859205/22-07; заявл. 28.12.79; опубл. 07.10.81. Бюл. № 37.
31. А.с. № 811510, МПК F 27 D 11/08, H05B 7/144. Способ определения положения рабочего конца электрода в ванне руднотермической электропечи / А.С. Микулинский, А.П. Шкирмонтов, П.В. Топильский, М.И. Друинский и др. – № 2692839/24-07; заявл. 08.12.78; опубл. 07.03.81. Бюл. № 9.
32. Свидетельство Российского авторского общества № 16433 о регистрации и депонировании произведения – результата интеллектуальной деятельности: Энерготехнологический критерий работы ферросплавной рудовосстановительной электропечи / А.П. Шкирмонтов. – заявл. 05.03.2010. Опубл. Реестр № 16433 от 23.03.2010. – М.: РАО. – 2010. – 5 с.

#### **Публикации в других периодических изданиях и сборниках конференций**

33. Шкирмонтов А.П. Улучшение энерготехнологических параметров рудовосстановительных электропечей // Главный энергетик. – 2009. – № 2. – С. 70 – 73.
34. Шкирмонтов А.П. Работа ферросплавной печи с увеличенным распадом электродов и дифференцированным способом загрузки шихты // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2009. – № 4. – С. 42 – 46.
35. Шкирмонтов А.П. Конструкция ферросплавной рудовосстановительной электропечи с увеличенным распадом электродов // Конструкторское бюро. – 2009. – № 5–6. – С. 49 – 62.

36. Шкирмонтов А.П. Величина тепловых потерь ваннами рудовосстановительных печей с различными значениями распада электродов при выплавке ферромарганца // Главный энергетик. – 2009. – № 5. – С. 36 – 37.
37. Шкирмонтов А.П. Разработка теоретических основ электрических режимов выплавки с увеличенным подэлектродным промежутком в рудовосстановительных печах // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2009. – № 5. – С. 25 – 33.
38. Шкирмонтов А.П. Разработка теоретических основ электрических режимов выплавки с увеличенным подэлектродным промежутком рудовосстановительных печах. Увеличение распада электродов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт.–2009.–№ 11.–С.45– 49.
39. Шкирмонтов А.П. Энерготехнологические параметры ферросилициевых рудовосстановительных печей // III Междунар. конф. «Металлургия – Интехэко 2010»: Сб. докл. – М.: Интехэко. – 2010. – С. 14 – 17.
40. Шкирмонтов А.П. Критерий работы ферросплавной рудовосстановительной электропечи, как фактор оценки энергоресурсосбережения // III Междунар. конф. «Металлургия–Интехэко 2010»: Сб. докл. – М.: Интехэко. – 2010. – С. 18 – 20.
41. Шкирмонтов А.П. Учёт факторов конструкции и технологии выплавки с помощью энерготехнологического критерия работы ферросплавной печи // Инновационный менеджмент. – 2010. – № 5. – С. 52 – 54.
42. Шкирмонтов А.П. Комплексная оценка параметров ферросплавных рудовосстановительных печей // Современные проблемы электрометаллургии стали: Материалы XIV Междунар. конф. – Ч. 1. – Челябинск: ЮУрГУ. – 2010. – С. 215 – 220.
43. Шкирмонтов А.П. Величина распада электродов в ферросплавной печи // Современные проблемы электрометаллургии стали: Материалы XIV Междунар. конф. – Ч. 1. – Челябинск: ЮУрГУ. – 2010. – С. 224 – 226.
44. Шкирмонтов А.П. Взаимосвязь диаметра электродов и электросопротивления ванны ферросплавной печи и их влияние на параметры агрегата // IV Междунар. конф. «Металлургия – Интехэко 2011»: Сб. докл. – М.: Интехэко. – 2011. – С. 30 – 34.
45. Шкирмонтов А.П. Составляющие энерготехнологического критерия работы ферросплавной электропечи // IV Междунар. конф. «Металлургия – Интехэко 2011»: Сб. докл. – М.: Интехэко. – 2011. – С. 26 – 29.
46. Шкирмонтов А.П. Развитие конструкций и технических решений для улучшения параметров ферросплавных электропечей // Конструкторское бюро. – 2012.– № 6.– С. 37 – 71.
47. Шкирмонтов А.П. Распад электродов и подэлектродный промежуток в ферросплавной печи при выплавке ферросилиция // V Междунар. конф. «Металлургия – Интехэко 2012»: Сб. докл. – М.: Интехэко. – 2012. – С. 110 – 113.
48. Шкирмонтов А.П. Зависимость увеличения распада электродов и величины подэлектродного промежутка в ферросплавной печи // V Междунар. конф. «Металлургия – Интехэко 2012»: Сб. докл. – М.: Интехэко. – 2012. – С. 114 – 116.

49. Шкирмонтов А.П. Увеличение распада электродов и треугольная ванна ферросплавной печи // V Международ. конф. «Металлургия – Интехэко 2012»: Сб. докл. – М.: Интехэко. – 2012. – С. 117 – 120.
50. Шкирмонтов А.П. Ферросплавные предприятия, как мощные потребители электроэнергии // IV Всеросс. конф. «Реконструкция энергетики»: Сб. докл. – М.: Интехэко. – 2012. – С. 80 – 81.
51. Шкирмонтов А.П. Восстановление кремния и переход его сплав при выплавке ферромарганца // Теоретические вопросы развития научной мысли в современном мире: Материалы II Междунар. конф. – Ч. 4. – Уфа: БашГУ. – 2013. – С. 167 – 171.
52. Шкирмонтов А.П. Влияние извлечения ведущего элемента в сплав на энерготехнологический критерий работы печи при выплавке ферросилиция и кремния // VI Междунар. конф. «Металлургия–Интехэко 2013»: Сб. докл. – М.: Интехэко. – 2013.– С. 69 – 71.
53. Шкирмонтов А.П. Тепловой КПД, удельный расход электроэнергии и энерготехнологический критерий работы ферросплавной электропечи // Современные проблемы электрометаллургии стали: Материалы XV Междунар. конф. Ч. 2. – Челябинск: ЮУрГУ. – 2013. – С. 210 – 213.
54. Шкирмонтов А.П. Восстановление марганца до карбида  $Mn_{23}C_6$  при выплавке кремнистого ферромарганца // Современные проблемы электрометаллургии стали: Материалы XV Междунар. конф. – Ч. 2. – Челябинск: ЮУрГУ. – 2013. – С. 193 – 196.
55. Шкирмонтов А.П. Оценка технических решений с помощью энерготехнологического критерия работы ферросплавной электропечи // Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершённых фундаментальных исследований и НИОКР: Труды научно-практической конф. с Междунар. участием. – Екатеринбург: ИМет УрО РАН. – 2013. – С.127 – 131.
56. Шкирмонтов А.П. Структура рабочего пространства печи при выплавке кремнистого ферромарганца // VII Междунар. конф. «Металлургия – Интехэко 2014»: Сб. докл. – М.: Интехэко. – 2014. – С. 37 – 42.
57. Шкирмонтов А.П. Строение ванны печи при выплавке ферросилиция с увеличенным подэлектродным промежутком // VII Междунар. конф. «Металлургия – Интехэко 2014»: Сб. докл. – М.: Интехэко. – 2014. – С. 43 – 45.
58. Шкирмонтов А.П. Выплавка марганцевого сплава для раскисления и легирования стали / А.П. Шкирмонтов, Л.Н. Белянчиков // XIII Междунар. конгресс сталеплавильщиков: Сб. докл. – Полевской: Северский трубный завод. – 2014. – С. 274 – 278.
59. Шкирмонтов А.П. Энерготехнологические параметры ферросплавной электропечи // VIII Международ. конф. «Металлургия – Интехэко 2015»: Сб. докл.. – М.: Интехэко. – 2015. – С. 17 – 20.
60. Шкирмонтов А.П. Влияние подэлектродного промежутка на энерготехнологический критерий работы ферросплавной электропечи // Современные проблемы электрометаллургии стали: Материалы XVI Междунар. конф. Ч.1.– Челябинск: ЮУрГУ.– 2015.– С. 134 –138.

61. Шкирмонтов А.П. Изменение энерготехнологического критерия работы ферросплавной печи при увеличении распада электродов и подэлектродного промежутка // Современные проблемы электрометаллургии стали: Материалы XVI Международ. конф. – Ч. 1. – Челябинск: ЮУрГУ. – 2015. – С. 130 – 134.
62. Шкирмонтов А.П. Изменение энерготехнологического критерия ферросплавной печи на различных режимах работы при выплавке ферромарганца // Новая наука: современное состояние и пути развития: Материалы Междунар. конф. – Стерлитамак: АМИ. – 2016. – С. 148 – 151.
63. Шкирмонтов А.П. Выбор рационального режима рудовосстановительной выплавки технического кремния с помощью энерготехнологического критерия работы электропечи // Приоритеты и научное обеспечение технологического прогресса: Сб. статей Междунар. конф. – Уфа: Аэтерна. – 2016. – С.119 – 122.
64. Шкирмонтов А.П. Энерготехнологический критерий работы ферросплавной электропечи при выплавке ферроникеля // Инновационные процессы в научной среде: Сб. статей Междунар. конф. Ч. 3. – Уфа: Омега Сайнс. – 2016. – С. 112 – 116.
65. Шкирмонтов А.П. Соотношение величины энерготехнологического критерия работы ферросплавной печи и удельного расхода электроэнергии при выплавке углеродистого феррохрома // Новые задачи технических наук и пути их решения: Сб. статей Международ. конф. – Уфа: Аэтерна. – 2017. – С. 267 – 269.
66. Шкирмонтов А.П. Изменение отношения тока электрода к рабочему напряжению при совершенствовании конструкций ферросплавных электропечей // Инновационные технологии и стратегии развития промышленности: Сб. статей Междунар. конф. – Уфа: Омега Сайнс. – 2017. – С. 129 – 132.
67. Шкирмонтов А.П. Конструктивные технические решения повышения активного сопротивления ванны ферросплавной электропечи // Электроцех.– 2017.– № 11.– С. 19–25.
68. Шкирмонтов А.П. Изменение энерготехнологического критерия работы ферросплавной электропечи при увеличении мощности печных трансформаторов // X Междунар. конф. «Металлургия–Интехэко 2018»: Сб. докл. – М.: Интехэко. – 2018. – С. 35 – 37.
69. Шкирмонтов А.П. Углеродистые восстановители с повышенным удельным электросопротивлением и параметры выплавки ферросплавов в электропечах // Электроцех. – 2018. – № 1-2. – С. 22 – 37.
70. Шкирмонтов А.П. Тепловой КПД ферросплавной электропечи // Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершённых фундаментальных исследований и НИОКР. Ферросплавы: Труды конф. с Междунар. участием. – Екатеринбург: Альфа-Принт. – 2018. – С. 273 – 276.
71. Шкирмонтов А.П. Энерготехнологический критерий работы ферросплавной печи при выплавке ферромарганца и феррохрома в плазменных электропечах // X Междунар. конф. «Металлургия – Интехэко 2018»: Сб. докл. – М.: Интехэко. – 2018. – С. 32 – 34.
72. Шкирмонтов А.П. Выплавка различных марок ферросилиция с увеличением мощности печей // Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием

- завершённых фундаментальных исследований и НИОКР. Ферросплавы: Тр. конф. с Междунар. участием. – Екатеринбург: ИМЕТ УрО РАН. – 2018. – С. 217 – 221.
73. Шкирмонтов А.П. Удельная производительность печи переменного и постоянного тока при выплавке углеродистого феррохрома // Физико-химические основы металлургических процессов: Междунар. научная конф. : Сб. трудов. – М.: ИМЕТ РАН. – 2019. – С. 71.
74. Шкирмонтов А.П. Изменение активного сопротивления ванны и удельного электросопротивления реакционной зоны выплавки ферросилиция при увеличении подэлектродного промежутка // Физико-химические основы металлургических процессов: Междунар. научная конф.: Сб. трудов. – М.: ИМЕТ РАН. – 2019. – С. 69.
75. Шкирмонтов А.П. Развитие теоретических основ совершенствования энерготехнологических параметров выплавки ферросплавов в электропечах // Современные проблемы электрометаллургии стали: Материалы XVIII Междунар. конф. – Ч. 1. – Челябинск: ЮУрГУ. – 2019. – С. 42 – 49.
76. Шкирмонтов А.П. Варианты повышения активного сопротивления ванны ферросплавной электропечи // Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершённых фундаментальных исследований и НИОКР: Труды конф. с Международным участием. – Екатеринбург: ИМЕТ УрО РАН. – 2020. – С. 222 – 225.

---

Шкирмонтов Александр Прокопьевич

Развитие теоретических основ совершенствования энерготехнологических параметров выплавки ферросплавов углеродотермическим процессом с целью повышения показателей работы электропечей // Автореф. дисс. на соискание учёной степени доктора технических наук

Подписано в печать 12.07.2021. Заказ

Формат 60×90/16. Объём 2 а.л. Тираж 120 экз.

Типография