

УТВЕРЖДАЮ

Директор по научной работе
ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н.Ульянова»,
доктор экономических наук, профессор

Е.Н. Кадышев

2021 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации

федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И. Н.
Ульянова» на диссертационную работу

Шкирмонтова Александра Прокопьевича

**«Развитие теоретических основ совершенствования энерготехнологических параметров
выплавки ферросплавов углеродотермическим процессом с целью повышения показате-
лей работы электропечей»**, представленную на соискание учёной степени доктора техниче-
ских наук по специальности 2.6.2 (05.16.02) – металлургия чёрных, цветных и редких металлов

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью повышения эффек-
тивности выплавки ферросплавов в электропечах. Тенденции в росте объёмов производства
высококачественной легированной стали, а также значительные объёмы товарных сплавов для
экспортных операций, определяют возрастающую потребность в ферросплавах. Основной объ-
ём производства ферросплавов массового сортамента получают в электропечах углеродотер-
мическим процессом на восстановлении ведущего элемента сплава из оксидов шихтовых мате-
риалов.

Ферросплавная печь работает в смешанном режиме выделения тепла: в режиме сопро-
тивления и в меньшей степени в режиме дуги. Процессы получения массовых ферросплавов в
электропечах относятся к разряду энергоёмких и материалоемких, при этом удельный расход
электроэнергии в 10–15 выше, чем на выплавку 1 т стали в дуговой печи.

С повышением мощности ферросплавных печей, ухудшением качества рудных мате-
риалов и восстановителей отмечается значительное снижение энерготехнологических парамет-
ров выплавки. К тому же имеет место увеличивающийся разрыв между установленной мощно-
стью трансформатора печи и активной мощностью в ванне, которая направлена на технологи-
ческий процесс. Это не позволяет достичь высоких показателей работы, ограничивает произво-
дительность плавильного агрегата и является актуальной научно-технической и хозяйственной
задачей.

Поэтому повышение энерготехнологических параметров работы ферросплавных печей,
как весьма мощных потребителей электроэнергии - важный вопрос энергоресурсосбережения и
основных принципов «бережливого производства».

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и четырёх приложений. Мате-
риал работы изложен на 302 страницах машинописного текста, содержит 36 рисунков, 32 таб-
лицы, библиографический список включает 228 источников, из них 34 иностранные источники.

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 энерготехнологических показателей выплавки. Отмечено, что сила тока электродов (в 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 (активных и индуктивных) электрических потерь, увеличивается разрыв между мощностью трансформатора и мощностью в ванне печи. Для улучшения этого используются углеродистые восстановители с повышенным удельным электросопротивлением (полукокс, газовые угли, спецкокс 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 разрежением под сводом печи; с пониженной частотой тока; в печах постоянного тока с открытой и закрытой дугой, а также в плазменных печах.

Во второй главе исследованы энерготехнологические параметры выплавки ферросплавов в электропечах, так как более 20 % электроэнергии страны расходуется в металлургии для получения чёрных, цветных металлов и сплавов. Производство ферросплавов в электропечах рудовосстановительным процессом является одним из наиболее энергоёмких и материалоёмких в металлургии. В технологическом процессе вынуждены использовать сравнительно бедные рудные материалы, увеличиваются объёмы перерабатываемого сырья на 1 т сплава и удельные расходы электроэнергии.

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 естественный коэффициент мощности и отмечается невысокий тепловой и электрический КПД. Поэтому вновь вводимые печи не превышают уровень мощности 81–105 МВ·А, который был достигнут в предыдущие десятилетия.

Рассмотрено аналитическое исследование причин ухудшения параметров ферросплавных печей. На основе зависимостей показано, что, повышение мощности традиционных ферросплавных печей приводит к снижению величины сопротивления ванны, что ухудшает в целом энерготехнологические параметры. Этим объясняется невыгодное явление, когда рост мощности печных трансформаторов не соответствует приросту мощности в ванне и производительности печи. Далее показано, что увеличение диаметра электродов также снижает активное сопротивление ванны ферросплавной печи. Для улучшения показателей ферросплавных печей диссертантом предложено в комплексе рассмотреть технологические, электрические параметры выплавки с учётом параметров тепловой работы ванны и конструкции печей.

В третьей главе на основании исследований для оценки работы ферросплавной печи была получена комплексная величина, которая характеризует технологию выплавки ферросплавов, электрический режим и тепловую работу ванны. Комплексный параметр получил название – энерготехнологический критерий работы ферросплавной электропечи и включает: извлечение ведущего элемента в сплав; тепловой КПД печи; коэффициент мощности печи; электрический КПД; коэффициент загрузки трансформатора.

На основании проведённого анализа работы печей выявлено, что снижение удельного расхода электроэнергии на выплавку ферросплавов, соответствует увеличению энерготехнологического критерия работы печи и повышению уровня эффективности агрегата с позиции энергоресурсосбережения.

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

Проанализировано извлечение ведущего элемента для сплавов кремния, хрома, марганца и никеля. Основным является максимально возможное содержание ведущего элемента в рудной части шихты при минимальном содержании вредных примесей.

Ферросплавная печь относится к низкошахтным электропечным агрегатам с невысоким тепловым КПД. Глубина ванны печи относительно невелика около 2,0–2,2 диаметра электрода, что определяет основную долю тепловых потерь через колошник печи. Для бесшлакового процесса выплавки в открытых печах тепловой КПД составляет около 0,46–0,52 и для закрытых печей равен 0,42–0,48 (в лучшем случае). Для шлакового процесса выплавки ферросплавов тепловой КПД иногда достигает уровня 0,52–0,54. Однако, в целом тепловой КПД, в 1,5–2,0 раза ниже, чем другие параметры энерготехнологического комплекса, а влияние теплового КПД на работу печи, в том числе на удельный расход электроэнергии и производительность, значительно выше.

Дальнейшее повышение мощности трансформаторов приводит к значительному снижению естественного коэффициента мощности печи, что является научно-технической проблемой. Это связано с тем, что рост мощности трансформаторов, не приводит к эквивалентному повышению активной мощности в ванне и повышению производительности. Соответственно отмечено определённое количество разработок в области технологии и конструкций печей, которые в какой-то мере направлены на решение данной проблемы. Далее рассмотрены такие параметры как электрический КПД и коэффициент загрузки трансформатора.

В пятой главе с позиции энерготехнологического критерия работы электропечи рассмотрена выплавка ферросилиция, углеродистого феррохрома, углеродистого ферромарганца, чернового ферроникеля и кремния технической чистоты. Аналогично выплавке ферросилиция, феррохрома и ферромарганца получено, что улучшение в работе этих печей соответствует повышению энерготехнологического критерия и снижению удельного расхода электроэнергии. Поэтому такая комплексная величина, как энерготехнологический критерий, может рассматриваться как основной элемент энергетического и технологического аудита для совершенствования конструкции печей и выявления эффективных режимов работы.

В шестой главе исследовано влияние подэлектродного промежутка и распада электродов на работу ферросплавной электропечи. Проанализировано большое количество данных расстояния (электрод–подина) для выплавки различных сплавов кремния, хрома и марганца, которые выражены через диаметр электрода печи.

Получена зависимость величины подэлектродного промежутка в ванне ферросплавной печи от распада электродов, которые выражены через диаметр электрода. 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.

При проведении кампаний 45 %-ном ферросилиция в условиях Аксуского завода ферросплавов выплавку 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), выраженных в диаметрах электрода соответственно. В результате сопротивление ванны и мощность в печи возросли в 2 раза. Снижился удельный расход электроэнергии, увеличился тепловой КПД, коэффициент мощности, электрический КПД и энерготехнологический критерий работы ферросплавной печи от 0,272 до 0,353 (+ 29,8 %).

В седьмой главе приведена оценка эффективности технических решений, с помощью энерготехнологического критерия работы ферросплавной печи и практические рекомендации. Наибольшее увеличение энерготехнологического критерия (40,0–48,3 %) получено при выплавке углеродистого ферромарганца в плазменной шахтной печи и углеродистого феррохрома (с открытой дугой) на 32,8–37,3 % в средншахтной печи с полым графитовым электродом и вдуванием плазмообразующего газа, по сравнению с базовыми вариантами.

Способ выплавки ферросплавов по концепции с увеличенными подэлектродным промежуток и распадом электродов повышает активное сопротивление ванны, напряжение и мощность печи в 2,0–2,6 раза, без увеличения силы тока электродов. Энерготехнологический критерий возрастает на 29,8 % (до 37,7–47,8 %). К тому же предложенная концепция выплавки ферросплавов переводит плавильный агрегат в разряд средншахтных электропечей.

В технологическом плане отмечено, что при частичной замене коксика на другие восстановители при выплавке ферросилиция наилучшие результаты получены при использовании полукокса и бурых углей, так как энерготехнологический критерий увеличился на 19,8 % и 17,3 % соответственно.

Выявлено, 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, что указывает на необходимость совершенствования таких технологий выплавки и особенно повышения эффективности системы источников питания постоянного тока.

Научная новизна работы

1. На основе теоретических положений и практических исследований получена новая информация о процессе выплавки ферросплавов в электропечах, при рассмотрении в комплексе технологических, электроэнергетических и теплотехнических параметров, что позволяет 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, электроэнергетических и теплотехнических параметров выплавки ферросплавов и однозначно характеризует эффективность работы электропечи углеродотермическим процессом. Она может быть использована для совершенствования технологии выплавки и конструкции ферросплавных печных агрегатов.

3. 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 в ферросплавной печи, 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 углеродотермическим процессом. Повышение мощности печей происходит в основном за счёт увеличения силы тока и, соответственно, диаметра электродов, а не рабочего напряжения. Это увеличивает разрыв между мощностью трансформатора и активной мощностью, выделяемой в ванне печи, которая потребляется на технологический процесс. Как следствие, 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. Для устранения этого требуется применение 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 более выгодно и эффективно энергетически. В результате при выплавке 45 %-ного ферросилиция улучшаются электрический КПД, коэффициент мощности и тепловой КПД без снижения извлечения ведущего элемента при получении стандартного ферросплава. Снижается удельный расход электроэнергии на выплавку и увеличивается энерготехнологический критерий ферросплавной печи (+ 35,7 %).

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 электропечи. 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 (в 2,1–2,8 раза) увеличенным относительным расходом электродов и более глубокой ванной. Это комплексное решение приводит к повышению каждого показателя – сопротивления ванны, напряжения и дополнительной мощности в ванне без ухудшения степени извлечения ведущего элемента в сплав при получении стандартного ферросплава. В результате улучшается коэффициент мощности, электрический и тепловой КПД печи, снижается удель-

ный расход электроэнергии. За счёт этого, в частности, при выплавке 45 %-ного ферросилиция энерготехнологический критерий увеличился до 37,7–47,8 %.

7. Теоретически обоснована и опробована новая технология выплавки ферросплавов в печи с увеличенным расpadом электродов при 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) такая технология выплавки значительно уменьшает токи «электрод–электрод» и повышает токи «электрод–подина». Это приводит к дополнительному росту активного сопротивления ванны и напряжения, что увеличивает мощность в ванне печи. Как показали исследования при выплавке 45%-ного ферросилиция, применение дифференцированно-го способа загрузки шихты в печь с увеличенным расpadом до 4,5–6,0 диаметров электрода в 2,8–2,9 раза повышает сопротивление ванны, напряжение и мощность, по сравнению с выплавкой в печи с обычным расpadом 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. 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 промышленной частоты, в печах с пониженной частотой тока, в печах постоянного тока с открытой и закрытой дугой, а также в плазменных печах.

Практическая значимость результатов работы

1. Практическая ценность работы заключается в дополнительно полученной информации о взаимосвязи технологических, электроэнергетических и теплотехнических параметров при шлаковой и бесшлаковой выплавке ферросплавов. Установлено, что при выплавке 75%-ного ферросилиция увеличение энерготехнологического критерия 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.

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 с целью улучшения энерготехнологических параметров процесса выплавки. Разработана и на Аксуском заводе ферросплавов опробована в полупромышленном варианте новая концепция выплавки ферросплавов на примере 45 %-ного ферросилиция с увеличенным подэлектродным промежутком и повышенным до 5,6 диаметров электродов расpadом электродов. В результате сопротивление ванны, мощность и рабочее напряжение увеличились в 2 раза при неизменных значениях силы тока и диаметра электродов.

При этом улучшились коэффициент мощности, электрический и тепловой КПД печи, удельный расход электроэнергии и энерготехнологический критерий печи увеличился на 29,8 % по сравнению с базовым вариантом. Ферросплавная печь с увеличенным подэлектродным промежутком переходит из разряда низкошахтных печей в разряд среднешахтных электропечей. При этом дополнительная мощность в ванну печи вводится благодаря увеличению рабочего напряжения, а не силы тока электрода, что энергетически более целесообразно.

В дальнейшем на заводе на основании результатов полупромышленных испытаний на печах РКЗ-16,5/22,5 был несколько увеличен диаметр распада электродов от проектных размеров 2,9 м до 3,7–3,8 м и на 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: для выявления наиболее перспективных и эффективных технологий выплавки ферросплавов; при проведении комплексного энерготехнологического аудита промышленных электропечей; при разработке новых печных агрегатов и технологий, а также для составления прогнозов и перспектив развития электрометаллургии ферросплавов.

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 с 3,0 до 3,4 м, а также использование углеродистых восстановителей с повышенным удельным электросопротивлением (полукокса) в комплексе увеличило энерготехнологический критерий ферросплавной печи с 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:

- на снижение удельного расхода электроэнергии;
- на уменьшение себестоимости получаемого сплава;
- на увеличение удельной производительности ферросплавной электропечи на 1 МВ·А установленной мощности трансформатора.

Кроме того, энерготехнологический критерий работы ферросплавной электропечи позволяет проводить сравнительной оценку эффективности выплавки ферросплавов и выбор оптимальных технических решений для печей различной конструкции – как в печах переменного тока, так и в печах постоянного тока, а также в плазменных печах.

Степень достоверности результатов исследований

Достоверность теоретических положений диссертации подтверждается результатами экспериментальных исследований, использованием традиционного способа электролитического моделирования работы электропечей, анализом большого количества практических данных выплавки ферросплавов на промышленных печах, а также результатами апробирования разработанных технологических схем выплавки в опытных крупномасштабных электропечах, в полупромышленном и промышленном вариантах.

Рекомендации по использованию результатов

Учитывая положительные результаты теоретических, лабораторных, полупромышленных и промышленных исследований, предложенных методов повышения эффективности работы электропечей, можно рекомендовать их использование в электрометаллургии ферросплавов ПАО «НЛМК», АО «СФЗ», АО «ЧЭМК», ООО «БЗФ», а также при совершенствовании и разработке плавильных агрегатов на ОАО НПО «Электротерм», и АО «СКБ Сибэлектротерм».

Публикации по теме диссертации

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, квартиль Q2); «Metallurgist» – 6 (Scopus, квартиль Q3).

Личное участие соискателя заключается в определении актуальности, цели работы и постановке задач исследования, в разработке методик, организации и проведении исследований, непосредственное участие в получении экспериментальных данных и проведении выплавки ферросплавов на различных энерготехнологических параметрах в электропечах; обработке, анализе и обобщении результатов исследований; в формулировании выводов; участие в апробации работы, в подготовке и написании статей в периодических изданиях и участие в конференциях. Во всех работах, выполненных в соавторстве, личный вклад состоял в постановке задачи, определении методов решения и интерпретации полученных результатов.

Ценность научных работ соискателя. Диссертация Шкирмонтова Александра Прокопьевича в целом является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные эффективные энерготехнологические решения в области выплавки ферросплавов для повышения показателей работы электропечей.

Специальность, которой соответствует диссертация. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.6.2 (05.16.02) – «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.

Замечания и вопросы по работе

1. Предложенный в работе комплексный энерготехнологический критерий Sh для оценки эффективности печной установки представлен в виде произведения функций-параметров (коэффициента загрузки печного трансформатора, электрического КПД, теплового КПД, коэффициента мощности, извлечения ведущего элемента) и по существу представляет собой функционал от нескольких независимых переменных. Приведенные аппроксимированные зависимости, в частности, энерготехнологического критерия от мощности трансформатора, удельного расхода электроэнергии, подэлектродного расстояния, от диаметра распада электродов и др. носят статистический характер и рассматриваются при варьировании одного фактора при неуказанных состояниях других. В этой связи они недостаточно информативны. Не всегда способ представления результатов рационален. Так, например, на рис. 5.7 (с.120) приведена статистическая зависимость критерия Sh от теплового КПД, которая описана кусочно-линейной функцией. Однако по смыслу формирования критерия Sh она прямо пропорциональна. При переходе на такой прием аппроксимации коэффициент корреляции резко снизится, что свидетельствует о влиянии дополнительных факторов.

При изучении закономерностей энерготехнологического критерия следовало бы использовать методы многофакторного анализа теории планирования экспериментов.

2. В работе предлагается использовать критерий Sh в качестве инструмента для анализа эффективности различных мероприятий по совершенствованию печей. Но к возможности использования количественного сравнительного анализа необходимо подходить осторожно, так

как достоверная точность критерия Sh невелика и связана с точностями определения его составляющих, анализ которых диссертант не привел. Суммарная погрешность критерия Sh определяется суммой погрешностей составляющих и может превышать 25-30%, что определяет необходимость дополнительного анализа достоверности выводов гл. 5,7.

3. Диссертант уделяет большое внимание исследованию влияния геометрических размеров ванны (диаметр электрода и их распад, заглубление, величина подэлектродного пространства) на сопротивление ванны печи, используя при этом простейший анализ токораспределения в ванне, моделирование на электролитической модели и т.д. Однако еще с 80-90-годов прошлого века известны работы по систематизированному анализу электромагнитных полей и сопротивлений ванн электрометаллургических печей как многошлаковых, так и с заметным проявлением дугового разряда, в которых они подробно изучены и с учетом неоднородности среды и газовых тиглей. Материалы опубликованы в ведущих научно-технических журналах, монографиях, докладывались на Всесоюзных, международных конференциях и Конгрессах (один из последних примеров обобщения материала - монография Миронова Ю.М. «Электротехника электрометаллургических печей резистивного, дугового и смешанного нагрева», М.: ИНФРА-М. 2018). Защищен ряд кандидатских и докторских диссертаций в Советах МЭИ, ЧГУ, НГТУ (докторская – Попов А.Н., кандидатские – Козлов А.И., Ильгачев А.Н. и др.). По тексту работы непонятно, знакомы ли эти работы диссертанту, во всяком случае в списке использованной литературы ни одна из этих работ не упомянута.

4. Основным методом повышения эффективности печей предлагаются различные мероприятия по повышению входного сопротивления ванны. Необходимо, однако, отметить, что увеличение сопротивления однозначно улучшает показатели печей только при проектировании новой печи с возможностью выбора трансформатора и оптимизации режима. На уже существующей печи со стандартным трансформатором этот метод дает неоднозначный результат, который определяется особенностями электрического режима печи. Увеличение сопротивления ванны при существующем режиме трансформатора всегда приводит к уменьшению тока и неоднозначному изменению активной мощности ванны. Известно, что эффективность выделения мощности в ванне определяется параметром $\frac{R_E}{Z_{kc}}$. Максимальная мощность выделяется при $\frac{R_E}{Z_{kc}} = 1$. При $\frac{R_E}{Z_{kc}} < 1$ увеличение сопротивления приводит к росту активной мощности, при $\frac{R_E}{Z_{kc}} > 1$ – к уменьшению, а следовательно, к снижению эффективности плавки. Поэтому без анализа существующего электрического режима печи рассуждения по воздействию увеличения сопротивления ванны недостаточно обоснованы.

5. В главе 7 диссертант выявляет достаточно тесную корреляционную связь критерия Sh с удельной производительностью. Это связано с тем, что критерий Sh фактически представляет собой сквозной КПД электротехнологического процесса. Но для производства важна и абсолютная производительность печи, которая влияет и на себестоимость (кстати, это автор почему-то не учитывает в выражениях 7.5 и 7.6). А абсолютная производительность при применении различных мероприятий зависит от изменений параметров электрического режима (см. замечание 4). Это должно учитываться при аудите печей.

6. При работе печи с автономными тиглями может возникнуть проблема с различием режимов работы фаз печи из-за несимметричного токоподвода, что приведет к различию скорости схода шихты и качества ферросплава в разных тиглях. Не освещены возможные проблемы с установкой индивидуальных леток для каждого электрода в рабочем пространстве действующего цеха и эксплуатацией установки.

7. Формула 3.5 (с.90) $R_{акт} = (U_{раб} \cdot \cos \varphi) : (1,73 \cdot I_{э})$ описывает активное сопротивление электрического контура печи с токоподводом, а не активное сопротивление ванны.

8. с. 125. Коэффициент мощности ферросплавной печи – это отношение активной мощности к используемой мощности на вторичной стороне электропечной установки. С учетом дуги и, соответственно, возникающих высших гармоник коэффициент мощности-это не совсем $\cos \varphi = (R_v + R_{кс}) : [(R_v + R_{кс})I + (X_{кс})I]^{1/2}$ и имеет более низкое значение.

Отмеченные замечания в определенной степени снижают ценность полученных результатов, но не отрицают их научную и практическую значимость.

Заключение

Диссертационная работа «Развитие теоретических основ совершенствования энерготехнологических параметров выплавки ферросплавов углеродотермическим процессом с целью повышения показателей работы электропечей» по своей актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости, степени достоверности результатов является законченной научно-квалификационной работой и соответствует требованиям, предъявляемым п. 9 Положения о присуждении учёных степеней (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 в ред. от 01.10.2018 г. с изм. от 26.05.2020 г. «О порядке присуждения учёных степеней»). Автор диссертации Шкирмонтов Александр Прокопьевич заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 2.6.2 (05.16.02) – металлургия черных цветных и редких металлов

Заключение принято на заседании кафедры электротехнологии, электрооборудования и автоматизированных производств ФГБОУ ВО «Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова» (протокол № 8, от «05» октября 2021 г).

Заведующий кафедрой электротехнологий,
электрооборудования и автоматизированных
производств, кандидат технических наук,
доцент

Калинин Алексей
Германович

Профессор кафедры электротехнологий,
электрооборудования и автоматизированных
производств, доктор технических наук,
профессор

Миронов Юрий
Михайлович

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Чувашский государственный
университет имени И.Н. Ульянова»

Адрес: 428015, Чувашская Республика, г. Чебоксары, Московский пр-т, д. 15.

Сайт: <https://www.chuvsu.ru/>

Эл. адреса: humanoid1984@yandex.ru, pro_nauch@chuvsu.ru

Тел.: +7(917)668-66-49, +7(8352)45-00-71, (8352)58-53-62

Подпись заверяю:

