

На правах рукописи



**СЕРИКОВ ВИКТОР АНДРЕЕВИЧ**

**АКУСТИЧЕСКИЕ И ВИБРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
СВЕРХМОЩНЫХ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ  
ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ**

**Специальность  
05.09.10 – Электротехнология**

**АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Новосибирск – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Чердниченко Владимир Семенович**

Официальные оппоненты: **Миронов Юрий Михайлович**  
доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования «Чувашский  
государственный университет имени  
И.Н. Ульянова», профессор кафедры  
автоматизированных электротехнологических  
установок и систем.

**Кузьмин Виктор Иванович**  
кандидат технических наук, Федеральное  
государственное бюджетное учреждение науки  
Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича Сибирского отделения  
Российской академии наук, старший научный  
сотрудник лаборатории физики  
плазменнодуговых и лазерных процессов.

Ведущая организация: Федеральное бюджетное учреждение науки  
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе  
Сибирского отделения Российской  
академии наук, г. Новосибирск.

Защита состоится 01 декабря 2016 года в 13<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте:  
[http://www.nstu.ru/science/dissertation\\_sov/dissertations/view?id=15761](http://www.nstu.ru/science/dissertation_sov/dissertations/view?id=15761).

Автореферат разослан \_\_\_\_ октября 2016 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



В.Ю. Нейман

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Дуговые сталеплавильные печи (ДСП) используются для получения углеродистых сталей и основной части высококачественных легированных сталей, которые очень сложно или невозможно выплавить в других металлургических агрегатах. Трехфазные ДСП являются одним из самых мощных потребителей электроэнергии с непрерывно изменяющимися во времени активной и реактивной мощностями по фазам. Применение на существующих ДСП трансформаторов мощностью до 100-150 МВ·А определяет эти агрегаты как сверхвысокомощные при рабочих токах в фазах до 100-150 кА.

Анализ этапов развития ДСП от электропечей обычной мощности с удельными мощностями 0,5 МВ·А на 1 тонну выплавляемого металла до высокоомощных и высокоимпедансных печей с мощностью 0,9-1,5 МВ·А/т показывают высокие темпы развития и совершенствования этого оборудования.

По каким-бы направлениям не развивались дуговые сталеплавильные электропечи в настоящем и будущем времени практически неизбежно будет сохраняться генерирование акустической энергии дуговыми разрядами и влияние на рабочие процессы электротехнологий вибраций, возникающих при взаимодействии акустических излучений с ограждающими поверхностями рабочего пространства: сводом, стенами печи и расплавом шлака и металла. Поэтому задачи, которые поставлены в диссертации, являются актуальными не только для совершенствования параметров работы действующих в промышленности ДСП, но окажутся важными и определяющими для создания электропечей нового поколения.

**Объектом исследования** являются сверхмощные дуговые сталеплавильные электропечи ДСП-30Н2 и ДСП-100И7, работающие на предприятиях России.

**Предмет исследования:** электрические и акустические характеристики ДСП; тепловые и энергообменные процессы, проходящие в рабочем пространстве и расплаве металла и шлака сверхмощных ДСП; надежность работы водоохлаждаемых панелей электропечи в условиях радиационно-конвективного теплообмена, акустических излучений и вибраций; скорости расплавления шихты в расплаве; способ повышения эффективности работы печи за счет диагностики периодов плавки путем измерения виброускорений датчиками, установленными на кожухе печей.

**Цель диссертационной работы.** Исследование акустических и вибрационных характеристик сверхмощных ДСП и их влияния на эксплуатационные параметры электропечей.

**Задачи,** решаемые для достижения поставленной цели:

1. Изучение физических процессов в дуговых разрядах, обеспечивающих формирование излучений акустической энергии в рабочем пространстве электропечей.
2. Разработка математической модели, описывающей физические процессы генерирования акустических излучений дуговыми разрядами.

3. Исследование процессов преобразования электрической энергии в акустическую с последующим развитием вибрационных процессов в замкнутом рабочем пространстве электропечей.

4. Расчет акустических характеристик на основе проведенных исследований физических основ шумообразования в ДСП.

5. Разработка математической модели для расчета мгновенных значений электрических параметров в трехфазных цепях дуговых печей с учетом переноса энергии по фазам.

6. Исследование влияния виброакустических процессов на теплообмен в рабочем пространстве печи; экранирование акустических излучений шихтой и водоохлаждаемыми панелями.

7. Исследование скоростей нагрева шихты в расплаве в условиях интенсивного воздействия вибраций.

**Научная новизна** результатов работы состоит в следующем:

1. Впервые показано, что акустические излучения дуговых разрядов и возникающие вибрации в рабочем пространстве дуговых электропечей при преобразовании акустической энергии в вибрационную интенсифицируют все процессы в ДСП, включая тепловые и термохимические, и являются составляющими факторами для увеличения производительности сталеплавильного оборудования.

2. Установлено, что акустическая и вибрационная энергии увеличивают коэффициенты теплообмена в 1,5 – 2 раза на поверхностях водоохлаждаемых панелей и твердой шихте, находящейся в расплаве.

3. Впервые получены критериальные оценки вероятности формирования гарнисажа на поверхностях шихты после ее загрузки в расплав металла.

4. Впервые разработан метод расчета уровня интенсивности звука, генерируемого дуговыми разрядами ДСП в рабочем пространстве и степени экранирования звука сводом, водоохлаждаемыми панелями и расплавом металла и шлака.

5. Установлена зависимость скорости расплавления фрагментов шихты в расплаве от интенсивности вибраций.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Полученные теоретические и экспериментальные результаты переданы в ОАО “СКБ Сибэлектротерм” и позволили более обоснованно выполнять анализ и синтез режимов работы дуговых печей и использовать при оптимизации режимов и создании современных автоматизированных систем управления технологическими процессами.

2. Проведенные исследования позволили дать рекомендации по уменьшению угара металла и увеличению скорости нагрева шихты в ДСП.

3. Диагностика периодов плавки с использованием измерений виброускорений на поверхностях кожуха электропечи позволяет с большей точностью проводить переключения режимов работы печей.

4. Разработан инженерный метод расчета акустических характеристик ДСП, что позволяет в полной мере выполнять требования

регламента Таможенного союза. «О технической безопасности машин и оборудования (ТР ТС 010/2011)»

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Установленное повышение эффективности использования вводимой в печь энергии и качественных показателей плавки за счет влияния акустической и вибрационной энергий на теплообмен в рабочем пространстве печи и в расплаве, а также интенсификации термохимических процессов.

2. Результаты исследований диагностики развития технологических периодов плавки путем измерений виброускорений датчиками, установленными на кожухе печей.

3. Метод расчета уровня интенсивности акустических излучений и виброускорений в ДСП и оценка степени экранирования акустических излучений кожухом и расплавом в печи.

4. Значения коэффициентов теплообмена при сопряженном радиационно-конвективном и акустическом взаимодействии энергетических потоков с внутренними поверхностями печей.

5. Результаты определения скорости плавления шихты в расплаве при сопряженном теплообмене теплопроводностью и вибрационном воздействии.

**Обоснованность и достоверность** полученных в диссертационной работе научных результатов, выводов и рекомендаций обеспечиваются корректным использованием применяемого математического аппарата, проверенного на адекватность путем сопоставления результатов с фактическими экспериментальными данными, а также сходимостью с результатами, полученными другими авторами. Обоснованность теоретических положений проверена их публикациями в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК России, и наукоемких базах Scopus.

#### **Использование результатов работы.**

1. Результаты диссертационной работы переданы для использования в ОАО «Сибэлектротерм» при разработке и создании перспективных дуговых электропечей.

2. По результатам работы дополнены курсы учебных дисциплин при подготовке магистров по магистерской программе «Электротермические процессы и установки» на кафедре автоматизированных электротехнологических установок государственного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет».

**Личный вклад автора.** В решении рассмотренных научных задач автор принимал непосредственное участие в разработке математической модели ДСП в ANSYS для определения избыточного давления в плазме дуги, математической модели электрического режима ДСП, математической модели акустических характеристик ДСП, физической и математической моделей теплообмена в рабочем пространстве печи с учетом виброакустических характеристик.

**Апробация работы:** основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- Международной конференции “Электротехника, Электротехнология, Энергетика” (ЭЭЭ-2015) – Electrical Engineering. Electrotechnology. Energy (EEE-2015), Новосибирск, 2015.
- VIII международной научной конференции “Энергия-2013”, Иваново. 2013.
- XII международной научно-практической интернет-конференции “Энерго-и ресурсосбережение - XXI век”. Орел. 2014.
- International scientific colloquium MEP-2014 “Modelling for electromagnetic processing”, Germany, Hannover, 16-19 Sept. 2014

**Публикации:** основное содержание диссертации опубликовано в 12 печатных работах, в том числе 8 в рецензируемых изданиях, вошедших в перечень рекомендованных ВАК РФ, 4 – в материалах международных и российских конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация включает в себя введение, 5 глав, заключение, приложения и список литературы из 102 наименований, содержит 147 страницы общего объема работы, 40 рисунков и 5 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы, сформулированы цели и задачи работы, отмечена научная новизна и практическая значимость работы, формулируются выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** проведен анализ теории современного состояния и путей развития дуговых сталеплавильных электропечей и металлургического производства. Отмечается, что в сверхмощных ДСП в мировой практике используются две электротехнологии выплавки стали в завершающем периоде: с применением пенистых шлаков с режимом работы на длинных дугах и без пенистых шлаков с режимами работы на коротких дугах. Приводятся характеристики выхода годного металла. Указывается, что при использовании любой электротехнологии шумовые характеристики ДСП изменяются незначительно. Отмечено, что ДСП являются одним из мощных источников звуковых волн, обеспечивающих загрязнение производственных помещений металлургических цехов. Проблема защиты обслуживающего персонала от шума в сталеплавильных цехах стоит особенно остро, так как звуковое давление воздействует не только на слуховой орган человека, но и на весь организм в целом. Известные попытки устанавливать электропечи в боксах (шатрах), отделяющих электропечи от цехового пространства, не получили широкого применения. До настоящего времени не разработаны методы защиты обслуживающего персонала от акустических излучений, существующих на рабочих площадках ДСП.

**Во второй главе** приводится аналитическое исследование акустического излучения в рабочем пространстве дуговых электропечей.

Шумообразование является неотъемлемой частью горения мощных дуговых разрядов, физической основой которой является интенсивное движение плазмы в прикатодной области и столбе дуговых разрядов. В основу создания физико-математической модели акустических процессов в ДСП положена теория дуговых разрядов Г. Меккера как магнитогидродинамических насосов, обеспечивающих осевое движение плазмы в дуге со скоростями более 6000 м/с. Шумообразование в энергонасыщенных катодных струях обусловлено турбулентными пульсациями давления плазмы, создаваемого магнитным полем тока дуги. Одновременно происходят скачки уплотнений в струях и взаимодействие между скачками уплотнений и турбулентными пульсациями. Начальный участок катодной струи характеризуется большими градиентами скорости плазмы, вызывающими мелкомасштабную локальную вихревую турбулентность, которая становится источником высокочастотных и ультразвуковых колебаний в газах. В цилиндрической части столба дуги существует мелко и крупноразмерная турбулентность, что вызывает среднечастотный шум. Дополнительной областью шумообразования в ДСП являются процессы встречи осевых газоплазменных потоков дуговых разрядов с твердым или расплавленным металлом и шлаком.

Интенсивность акустических характеристик и частотный диапазон их изменения зависят от мгновенных значений токов в дуговых разрядах, магнитное поле которых создает в столбе разрядов избыточное давление в соответствии с уравнением:

$$p(\tau) = \mu_0 \frac{[i(\tau)]^2}{4\pi^2 R^2} \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right), \quad (1)$$

где  $i(\tau)$  – мгновенное значение тока, определяемое в соответствии с математической моделью электрического режима работы ДСП, А;  $p_{\max} = \mu_0 [i(\tau)]^2 / (4\pi^2 R^2)$  – давление газа на оси дуги, Па;  $\mu_0$  – магнитная постоянная, Гн/м;  $R$  – радиус дуги, м.

С использованием уравнения (1) рассчитывается интенсивность генерируемого звука  $I$  – скалярной физической величины, которая характеризует плотность звуковой мощности, переносимой звуковой волной в направлении ее распространения.

$$I = \frac{[p(\tau)]^2}{\rho \cdot c} = \frac{\mu_0^2 [i(\tau)]^4}{[4\pi^2 R^2]^2 \cdot \rho \cdot c}, \quad (2)$$

где  $p(\tau)$  – значение давления, равное избыточному давлению газа в дуге, рассчитывается по уравнению (1), Па;  $c$  – скорость звука в воздухе, м/с;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Уровень интенсивности звука  $L$  определяется по уравнению:

$$L = 10 \cdot \lg(I / I_0), \quad (3)$$

где  $I_0 = 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup> – стандартизированное пороговое значение интенсивности звука.

Таким образом, уравнения (1) – (3) совместно с системой уравнений для расчета  $i(\tau)$  представляет собой математическую модель для определения акустических характеристик дуговых разрядов.

Приведена математическая модель электрических характеристик ДСП, необходимых для расчетов акустических параметров электропечей  $i(\tau)$ . В математической модели используются инновационные подходы расчетов характеристик с помощью theta-параметров, которые учитывают последовательно соединенные дуги, возникающие между электродами и шихтой, а также дуги между фрагментами шихты на участках цепи между электродами.

На рисунке 1 приведена схема замещения электропечного контура трехфазной ДСП, включающая  $R_{\tau 1}, R_{\tau 2}, R_{\tau 3}, L_{\tau 1}, L_{\tau 2}, L_{\tau 3}$  – активные

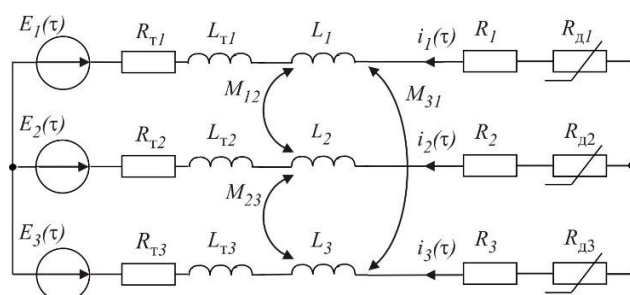


Рисунок 1 – Схема замещения электропечного контура трехфазной ДСП

сопротивления и индуктивности обмоток трансформатора;  $M_{12}, M_{23}, M_{31}, L_1, L_2, L_3$  – индуктивности и взаимные индуктивности фаз короткой сети;  $R_1, R_2, R_3$  – активные сопротивления участков цепи;  $R_{д1}, R_{д2}, R_{д3}$  – сопротивления участков цепи, содержащих дуговые разряды;  $E_1, E_2, E_3$  – фазные напряжения.

Математическая модель протекающих токов в цепях включает алгебраическое уравнение суммы фазных токов (4), записанное на основе первого закона Кирхгофа, двух дифференциальных уравнений (5) и (6), записанных на основе второго закона Кирхгофа, и трех дифференциальных уравнений для проводимостей  $q_j$  участков цепей, содержащих дуговые разряды (7).

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0, \quad (4)$$

$$i_1 \left( R_{\tau 1} + R_1 + \frac{1}{q_1} \right) + \frac{di_1}{d\tau} (L_{\tau 1} + L_1 - M_{12}) - i_2 \left( R_{\tau 2} + R_2 + \frac{1}{q_2} \right) - \frac{di_2}{d\tau} (L_{\tau 2} + L_2 - M_{12}) + \frac{di_3}{d\tau} (M_{13} - M_{23}) = E_1 - E_2, \quad (5)$$

$$i_2 \left( R_{\tau 2} + R_2 + \frac{1}{q_2} \right) + \frac{di_2}{d\tau} (L_{\tau 2} + L_2 - M_{23}) - i_3 \left( R_{\tau 3} + R_3 + \frac{1}{q_3} \right) + \frac{di_3}{d\tau} (M_{23} - L_{\tau 3} - L_3) - \frac{di_1}{d\tau} (M_{12} - M_{13}) = E_2 - E_3, \quad (6)$$

$$\frac{dq_j^\Sigma}{d\tau} = \frac{1}{\theta_j^\Sigma} \left( \frac{i_j^2}{q_j^\Sigma \cdot U_j^2} - q_j^\Sigma \right) \quad (7)$$



где  $j = 1, 2, 3$  – номер фазы;  $\theta_j^\Sigma$  – theta-параметр, учитывающий изменения проводимости во время плавки участков электрической цепи, содержащих дуговые разряды;  $U_j$  – действующие значения напряжения на участках цепи, содержащих дуги в фазах 1, 2, 3;  $q_j$  – проводимость участка цепи фазы, содержащего дуговые разряды;  $i_j$  – мгновенное значение тока.

При численном решении системы уравнений модели для  $U_j$  использовалось уравнение:

$$U_j = U_{dj}(\tau) + \sigma_j \cdot \xi_j, \quad (8)$$

где  $U_{dj}(\tau)$  – действующее напряжение на дуге, задаваемое регулятором;  $\sigma_j$  – среднеквадратичные отклонения;  $\xi_j$  – одно из значений нормально распределенной величины  $X$  с математическим ожиданием 0 и дисперсией 1.

Дифференциальное уравнение для проводимости фазы (7) дополнено случайным законом распределения для действующего значения напряжения дуговых разрядов. Исходными данными для этой операции являются математические ожидания и среднеквадратичные отклонения  $\sigma_j$  действующих значений дуг, приведенные в таблице.

Таблица – Результаты расчета по выборке

Математическое ожидание, В			Среднеквадратичное отклонение, В			Коэффициенты корреляции, %		
$U_1$	$U_2$	$U_3$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$r_{12}$	$r_{13}$	$r_{23}$
277	251	265	30,5	37,5	25,3	2,2	1,8	2,6

В работе показано, что в уравнении (7) возможно использовать новое понятие theta-параметра ( $\theta_j^\Sigma$ ), характеризующее энергетическое состояние всей фазы, а не только дугового разряда. При тестировании математической модели на промышленной электропечи ДСП 30Н2 при проведении полного цикла плавки с получением полупродукта без использования систем интенсификации получены значения  $\theta_j^\Sigma$  – theta-параметров фаз при их изменении во времени. На рисунке 2 приведены зависимости  $\theta_j^\Sigma = f(\tau)$  при расплавлении второй корзины с массой шихты 17,5 т с использованием пенистого шлака.

Параметр  $\theta_j^\Sigma$  содержит интегральную информацию каждой из фаз электропечи, характеризующую протекание электрических и технологических процессов в рабочем пространстве печей. Существенная нелинейность  $\theta_j^\Sigma$  в первый период плавки и связанное с этим максимальное значение акустических характеристик определяется существованием дуговых разрядов между фрагментами шихты.

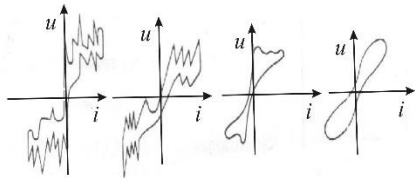
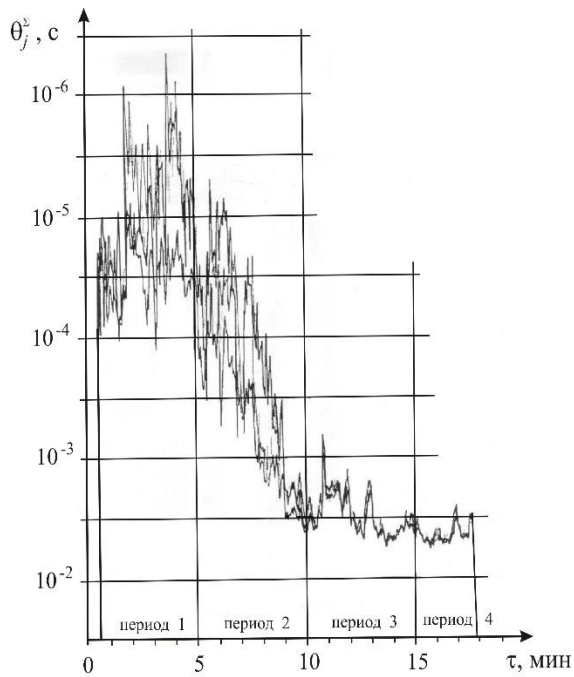


Рисунок 2 – Изменение theta-параметра трех фаз в зависимости от времени расплавления шихты массой 17,5 тонн и динамические ВАХ для каждого периода расплавления загрузки

В первый период плавки  $\theta_j^\Sigma$  изменяется от  $5 \cdot 10^{-6}$  с до  $10^{-4}$  с при уровне интенсивности звука на рабочей площадке выше 130 дБ. Во втором периоде  $\theta_j^\Sigma$  увеличивается до значения  $3 \cdot 10^{-3}$  с, а уровень интенсивности звука снижается до 115-117 дБ. Третий период плавки соответствует горению дуговых разрядов на расплав  $\theta_j^\Sigma = (2-5) \cdot 10^{-3}$  с, а при заглублинии дуги в пенистый шлак (период 4)  $\theta_j^\Sigma$  увеличивается до  $5,5 \cdot 10^{-3}$  с, а уровень звука уменьшается до 105-110 дБ.

При использовании значений  $\theta_j^\Sigma$  для каждого периода плавки в математической модели (4)-(7) получены характеристики мгновенных значений токов в фазах, напряжений на дугах и динамические ВАХ, сравнение которых с экспериментальными показали их совпадение и адекватность математической модели электрических режимов ДСП.

В третьей главе приведены результаты моделирования электрического режима и акустических характеристик ДСП с использованием математической модели в составе уравнений (1)-(7). На рисунке 3 приведены расчетные значения мгновенных значений проводимостей и напряжений на дугах трех фаз.

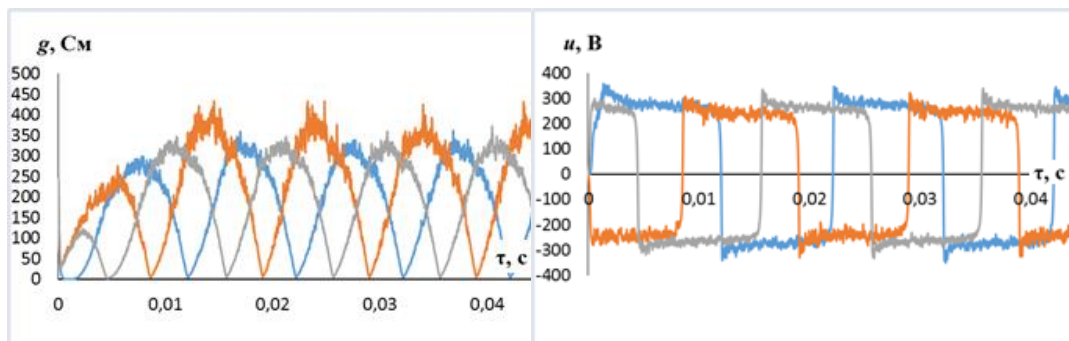


Рисунок 3 – Мгновенные значения проводимостей фаз и напряжений на дугах ДСП

На рисунке 4 приведена зависимость избыточного давления  $p = f(\tau)$  в дуговых разрядах трех фаз в первый период плавки. В последующие периоды

плавки происходит снижение амплитудного значения давлений до значений в четвертом периоде плавки на 15 кПа меньше, чем в первом периоде.

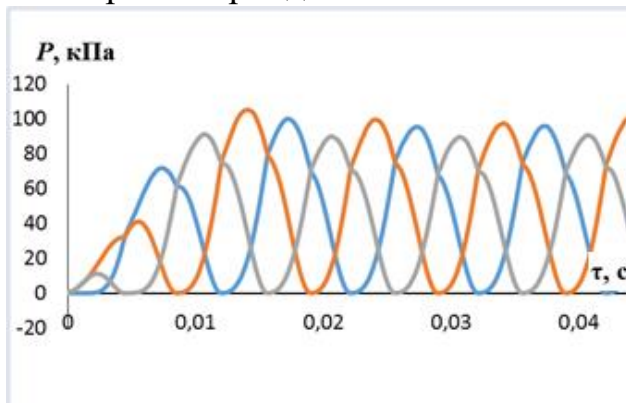


Рисунок 4 – Зависимость давления в дуговых разрядах трех фаз от времени в первый период плавки

Изменения давлений происходит с частотой  $f = 100$  Гц и амплитудным значением избыточного давления, близким к атмосферному. Пульсационное изменение давления в дуговом разряде обеспечивает турбулизацию в газоплазменной прикатодной области, столбе разряда и на поверхности расплава с формированием вихрей и генерацией акустических излучений.

Уровни интенсивности звука в области его генерирования (в дуговом разряде) достигают 200 дБ и мало изменяются в процессе плавки (рисунок 5). На поверхности кожуха печи за счет существенного уменьшения температуры газовой среды до 2000 К и снижения скорости звука уровень интенсивности акустического излучения во все периоды плавки без учета экранирования шихтой и пенистым шлаком имеет среднее значение 154 дБ. Зависимость уровня интенсивности звука на кожухе ДСП для трех фаз приведена на рисунке 6.

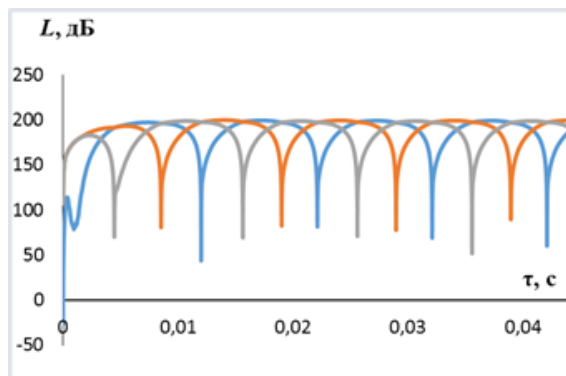


Рисунок 5 – Зависимость уровня интенсивности звука  $L$  на осях дуг для трех фаз от времени в первый период плавки

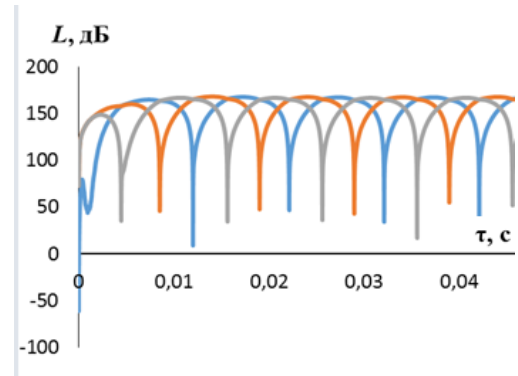


Рисунок 6 – Зависимость уровня интенсивности звука  $L$  на кожухе ДСП для трех фаз от времени в первый период плавки

На рабочую площадку электропечи на расстоянии 5 м от рабочего окна (рабочее место сталевара) акустическое излучение проникает через щели рабочего окна, через песочный затвор и электродные отверстия. Экранирующее действие кожуха электропечи приводит к величине уровня интенсивности звука на рабочей площадке сталевара не выше 125 дБ, что подтверждается экспериментальными измерениями.

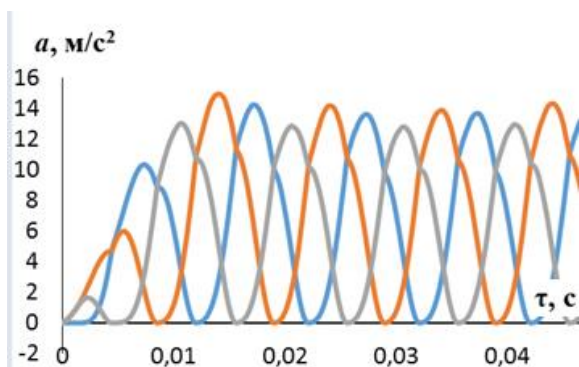


Рисунок 7 – Зависимость вибрационных ускорений на кожухе ДСП трех фаз

Расчетные значения вибрационных ускорений на кожухе печи, возникающих за счет взаимодействия поверхностей кожуха с акустическими потоками энергии, приведены на рисунке 7 без учета экранирования шихтой и пенным шлаком. Уровень интенсивности акустического излучения на поверхностях водоохлаждаемых панелей в среднем принимался  $L = 154$  дБ.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментального исследования вибрационных характеристик ДСП для разработки инженерных методов диагностики различных периодов плавки. Высокий расчетный уровень виброускорений на кожухе печи без учета экранирующих процессов акустических излучений шихтой и пенным шлаком позволил разработать физические основы диагностики развития технологических процессов в рабочем пространстве печи. В эксперименте проводилось измерение изменений виброускорений и виброскорости в средней координате водоохлаждаемых панелей по высоте с использованием анализатора спектра вибраций типа 795 М. Спектральный состав виброскорости содержал составляющие от 2 до 400 Гц. Результаты измерений при частотах больше 400 Гц оказались малоинформативными. На рисунке 8 приведены виброграммы последовательных периодов плавки шихты массой 17,5 т в течении 15 мин.

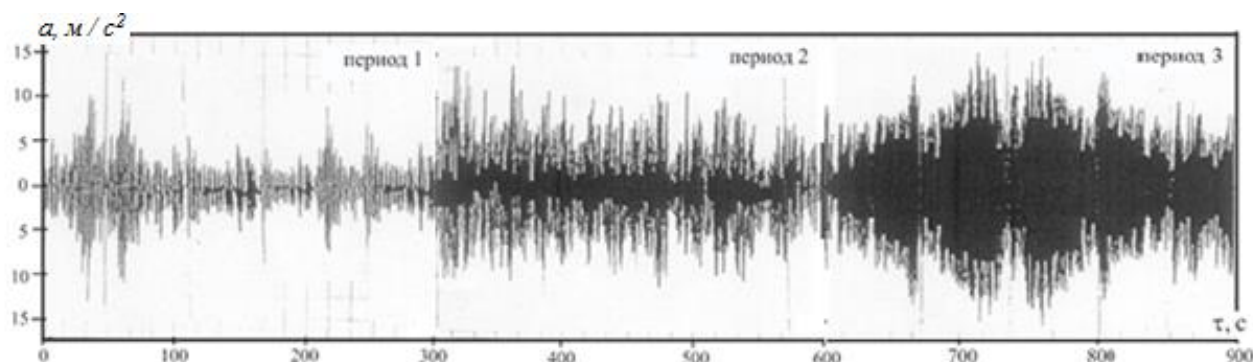


Рисунок 8 – Вибрационные характеристики последовательных периодов плавки шихты

В первый период плавки  $\tau \leq 300$  с при проплавлении колодцев экранирование шихтой акустических излучений оказалось максимальным и составляет 80-85% в зависимости от плотности укладки шихты. Для этого периода виброускорение имеет малый размах, превышающий  $3 \text{ м/с}^2$  только в ударные газодинамические моменты режимов. Во второй период плавки (от 300 до 600 с) вибрации имеют стабильный характер, виброускорение

изменяется в диапазоне от 5 до 7 м/с<sup>2</sup> с ударными всплесками до 10 м/с<sup>2</sup>. Установка трех датчиков на панелях под углом 120° напротив каждого электрода позволяет диагностировать синхронность проплавления колодцев с возможностью изменения вводимой энергии по фазам. В третьем периоде плавки виброускорение имеет размах от 7 до 15 м/с<sup>2</sup> и зависит от высоты пенного шлака и степени заглубления дуговых разрядов в расплав.

Существенное различие виброхарактеристик для различных периодов плавки позволяет их использовать для контроля скоростей расплавления шихты, расположенной под каждой фазой, и высоты пенного шлака.

Рассмотрено влияние виброакустических процессов на теплообмен в рабочем пространстве электропечей на водоохлаждаемых стенах. Схема

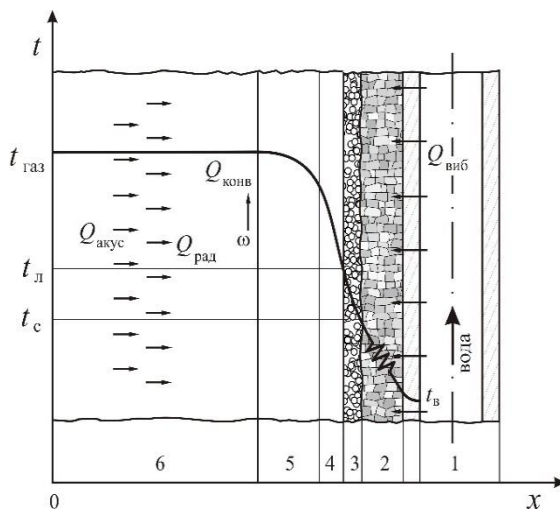


Рисунок 9 – Схема сложного теплообмена на поверхности водоохлаждаемой стеновой панели в ДСП

сложного теплообмена на поверхности водоохлаждаемой стеновой панели ДСП приведена на рисунке 9 и включает поверхность водоохлаждаемой трубы 1, самоформирующийся гарнисаж 2, двухфазный подслои 3, ламинарный пограничный слой 4, газодинамический пограничный слой 5, турбулизированную паропылевою газовую смесь 6. Здесь введены следующие обозначения:  $t_v$  – температура охлаждающей воды;  $t_l$  и  $t_c$  – температура ликвидуса и солидуса расплава гарнисажа;  $t_{газ}$  – температура паропылегазовой смеси;  $\omega$  – скорость газового потока. На гарнисаж воздействуют потоки энергии:

радиационный –  $Q_{рад}$ , конвективный –  $Q_{конв}$ , акустический –  $Q_{акус}$ , вибрационный –  $Q_{виб.}$

Теоретическая часть задачи для постановки физической части модели решалась на основе закона сохранения и превращения энергии, который выражается в виде первого начала термодинамики. В результате получено уравнение сложного теплообмена с учетом влияния виброакустического воздействия на теплообмен:

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} t) + q_v + E_{рез} + A_v + \frac{Dp}{d\tau} - \frac{p}{\rho} \frac{D\rho}{d\tau} = \rho \frac{Di}{d\tau} + \rho \frac{D\omega^2 / 2}{d\tau} \quad (8)$$

где  $Dp/d\tau$ ,  $D\rho/d\tau$ ,  $D\omega^2/d\tau$ ,  $Di/d\tau$  – субстанциональные производные давления газопылевой смеси, плотности среды, скорости движения газа, энтальпии газа;  $q_v$  – количество энергии, выделяемой виброакустическими источниками,  $A_v$  – работа, совершаемая внешними силами над единицей объема среды за единицу времени;  $\lambda$  – теплопроводность гарнисажа;  $t$  – температура.

Уравнение (8) показывает, что при одновременном воздействии радиационных и акустических потоков энергии на поверхности, на которых имеется конвективный теплообмен, в движущейся среде теплоперенос

осуществляется в пограничных слоях 4 и 5 (рисунок 9) не только за счет теплопроводности, но и вследствие переноса теплоты турбулизированными частицами газа. При этом интенсивность теплообмена существенно увеличивается и оказывается пропорциональной мгновенным значениям энтальпии  $i$  и скорости частиц газа  $\omega$ , которые изменяются под воздействием виброакустических и радиационных потоков энергии.

Тепловое сопротивление пограничных слоев (рисунок 9) уменьшается за счет развития локальных вихревых процессов с нарушением однородности свойств паропылегазовой среды под влиянием дополнительных источников энергии. В этом состоит физический механизм влияния на конвективный теплообмен виброакустических и радиационных источников теплоты в сложном теплообмене при изменяющихся во времени значений  $q_v(\tau)$  и  $E_{рез}(\tau)$ .

Рассматриваемый теплообмен зависит от многих факторов, теплофизические процессы которых до настоящего времени не изучены. Преодоление этих трудностей осуществлено путем использования экспериментально-эмпирических методов практических расчетов, в которых сложность процессов теплообмена перенесена на коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ .

Экспериментальное определение  $\alpha$  проводилось путем измерения удельного теплового потока  $q_c = Q_\Sigma / F$  и температурного напора  $\Delta t_1 = t_c - t_g$  с последующим определением  $\alpha = q_c / \Delta t_1$ . Калориметрирование осуществлялось водоохлаждаемой стеновой панели печи, изготовленной из трубы размером  $\varnothing 76 \times 10$  мм с общей площадью панели  $F = 2,1 \text{ м}^2$ . Проводилось измерение расхода воды  $G$ , м<sup>3</sup>/ч, нагрева воды  $\Delta t_g = t_g - t_0$ , °С и виброускорения в центральной части панели  $a$ , м/с<sup>2</sup>. Расчетная скорость воды в трубе  $v = 2$  м/с. Тепловой поток определялся по уравнению  $P_\Sigma = CG\Delta t_g$ , где  $C$  – удельная теплоемкость воды.

В первый период плавки при максимальном экранировании шихтой радиационного и акустического излучения (степень экранирования  $K = 0,8 \div 0,85$ ) коэффициент теплообмена  $\alpha$  на поверхности гарнисажа изменяется в диапазоне от 0,5 до 0,6 кВт/(м<sup>2</sup>·°С) при плотности тепловых потоков, не превышающих 50-60 кВт/м<sup>2</sup>. В этих условиях может происходить наращивание гарнисажа за счет взаимодействия его поверхности с паропылевой составляющей при ослабленном воздействии вибрации. Акустическое излучение за счет отражений от окружающих поверхностей заполняет все рабочее пространство печи. Виброускорение на панелях и кожухе печи превышает 3 м/с<sup>2</sup> только в ударные моменты режима.

Во второй период плавки степень экранирования шихтой радиационного и акустического излучений снижается до  $K = 0,3 \div 0,45$ , виброускорение на панелях возрастает до 7 м/с<sup>2</sup>, тепловой поток на панелях увеличивается до 120-130 кВт/м<sup>2</sup>, а коэффициент теплообмена возрастает до  $\alpha = 1,5$  кВт/(м<sup>2</sup>·°С).

После расплавления основного объема шихты в третьем периоде плавки дуговой разряд экранируется мениском в пенном шлаке и металле, источником радиационного излучения в рабочем пространстве являются

запыленные газы с температурой до 1600 °С, поверхность расплава и графитированные электроды. Акустическое излучение частично трансформируется в вибрационную энергию, а звуковая часть распространяется в рабочем пространстве печи. Тепловой поток на водоохлаждаемые панели достигает максимального значения, виброускорение изменяется в диапазоне от 7 до 15 м/с<sup>2</sup>, а средний коэффициент теплообмена  $\alpha$  имеет значение более 2,5 кВт/(м<sup>2</sup>·°С). Средние по времени плотности тепловых потоков не превышают 250 кВт/м<sup>2</sup>, но в этот период наблюдаются пиковые значения длительностью до 30 с, превышающие среднее значение плотности тепловых потоков в 1,5-2 раза. Этот вывод имеет экспертный характер, так как измеренные колебательные значения температуры воды не позволили провести точную количественную оценку увеличения плотностей тепловых потоков из-за дестабилизации режимов охлаждения панели. Последующая визуальная оценка поверхности гарнисажа на водоохлаждаемой панели после остановки печи показала наличие областей локального сплавления гарнисажа при сохранении части гарнисажа на панели.

**В пятой главе** приведены результаты исследования нагрева шихты в расплаве при воздействии перемешивания и вибраций. На основе решений балансовых уравнений теплообмена между фрагментами шихты и расплавом показано, что результирующая эффективность плавки в ДСП достигается при увеличении массы остаточного расплава в ванне печи (болота) с уменьшением угара металла и интенсификацией перемешивания расплава за счет действия струйного осевого истечения плазмы из дуговых разрядов. При использовании сильноточных режимов при нагреве расплава дуговыми разрядами, заглубленными в расплав шлака и металла, обеспечивается максимальное воздействие вибраций на теплообмен между фрагментами шихты и расплавом в ванне печи.

Создание пенистого шлака и перемешивание расплава осуществляется окислением углеродного порошка, вдуваемого в расплав. В результате интенсивного барботирования ванны в пенистых шлаках содержится до 5% металлического железа. Дополнительно за счет окисления железа выход годного по железу составляет 90-92%.

Численными расчетами доказано, что при коэффициентах теплообмена на поверхностях фрагментов шихты  $\alpha \geq 1,3$  кВт / (м<sup>2</sup> · К) гарнисаж не образуется, а расплавление фрагментов шихты происходит при  $\alpha \geq 10$  кВт / (м<sup>2</sup> · К) с формированием поверхностного теплоусваивающего слоя, размер которого зависит от величины теплового потока, теплофизических свойств шихты и геометрических размеров кусков шихты.

Показано, что при существующих технологиях перемешивания расплава в печи и действии вибрации с виброускорением до 15 м/с<sup>2</sup> плотности тепловых потоков на поверхностях шихты достигают величины от 4000 до 6000 кВт/м<sup>2</sup>. В этих условиях теплоусваивающий слой плавится со скоростями, превышающими скорости формирования аккумулируемой

энергии во фрагменте шихты, а коэффициенты теплообмена  $\alpha$  достигают величины 25 - 30 кВт / (м<sup>2</sup> · К).

Исходная система дифференциальных уравнений, характеризующих процессы при формировании теплоусваивающего слоя на поверхностях шихты, включают следующие уравнения:

$$\left. \begin{aligned} a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} + V(\tau) \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} &= \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau}, \quad 0 < x < l(\tau); \\ \lambda \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} &= V(\tau) [p\gamma + c\gamma(t_p - t_{пл})] - q(\tau); \\ t(x, \tau) \Big|_{x=0} &= t_{пл}; \quad t(x, \tau) \Big|_{x \rightarrow \infty} \rightarrow t_{пл}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где  $\tau$  – время;  $x$  – координата вглубь теплоусваивающего слоя;  $V(\tau)$  – линейная скорость расплавления шихты по координате  $x$ ;  $a$  – коэффициент температуропроводности шихты;  $t_{пл}$  – температура плавления;  $p$  – скрытая теплота плавления металла;  $\gamma$  – удельная масса металла;  $c$  – теплоемкость металла;  $t_p$  – температура расплава;  $q(\tau) = \alpha(t_p - t_{пл})$  – удельная мощность на поверхности плавления;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи на поверхности фрагмента шихты.

Зависимость линейной скорости расплавления фрагментов шихты в расплаве от времени плавки приведена на рисунке 10.

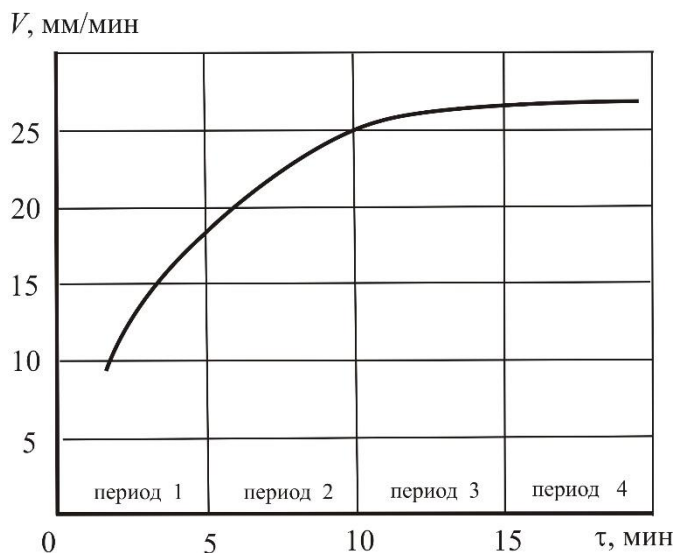


Рисунок 10 – Зависимость линейной скорости расплавления фрагментов шихты в расплаве от времени плавки

Весь цикл плавки одной корзины шихты был разделен на четыре периода в соответствии с изменением диагностических  $\theta$ -параметров и вибрационных параметров, характеризующих электрические режимы введения энергии в печь для каждой фазы. Первый период длительностью 5 минут включает проплавление колодцев до половины полной глубины колодцев; второй период длительностью также 5 минут – развал колодцев и завершение проплавления колодцев; в третьем

и четвертом периодах дуговые разряды горят на поверхность расплава шлака и металла.

В первый период наблюдается максимальное экранирование акустической и вибрационной энергии шихтой с передачей в ванну расплава минимальной энергии вибраций за счет демпфирования колебаний отдельными фрагментами шихты. Во второй период плавки нижние слои



шихты сплавляются за счет стекающего металла при расплавлении верхней части загрузки, степень демпфирования снижается и в расплав передается средний уровень вибраций. Это способствует увеличению коэффициента теплообмена на поверхности фрагментов шихты в расплаве до  $20 - 22 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  с увеличением удельной тепловой мощности  $q(\tau)$ . В третий и четвертый периоды плавки дуговые разряды углубляются в расплав с максимальным экранированием акустической энергии, генерируемой дугами, и трансформацией этой энергии в вибрационную в ванне расплава. Коэффициенты теплообмена на поверхностях фрагментов шихты возрастают до  $30 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  и больше.

Показано, что скорость расплавления шихты в расплаве металла и шлака изменяется пропорционально увеличению интенсивности перемешивания и вибрации. Для стали, содержащей 1 % углерода, при исходной температуре расплава  $t_p = 1600 \text{ }^\circ\text{C}$  и неизменной скорости движения расплава при перемешивании скорость расплавления изменяется от 10 мм / мин до 27 мм / мин. Максимальная скорость плавления шихты достигается при полном заглублении дуговых разрядов в жидкий металл и шлак.

Установлено, что скорость расплавления шихты зависит от исходной температуры расплава, интенсивности вибрации и перемешивания. При насыпной массе загружаемой шихты в расплав  $m = 0,8 \text{ т}/\text{м}^3$  вся шихта, включая крупногабаритную (при периодической загрузке и  $t_p = 1600 \text{ }^\circ\text{C}$ ), расплавляется за 12-15 минут в сверхмощных печах с удельной мощностью больше  $0,8 \text{ МВ} \cdot \text{А}/\text{т}$  при существующих технологиях плавки.

Рассматриваемая проблема работы ДСП имеет внутренние противоречия. Для снижения угара металла и удельного расхода электроэнергии необходимо снижать его температуру на выпуске, а для увеличения скорости плавления шихты при очередной загрузке в остаток жидкого металла и шлака в печи необходимо иметь большую температуру расплава и максимальные вибрационные характеристики, которые обеспечиваются при больших токах. Полученные количественные характеристики коэффициентов теплообмена и скоростей плавления имеют частный характер, так как зависят от вязкости, теплоемкости, температур плавления, интенсивностей перемешивания, вибраций и температуры нагрева расплава.

**В заключении** представлены основные результаты диссертационной работы.

1. Установлено, что акустическое излучение дуговых разрядов и возникающие вибрации в рабочем пространстве ДСП являются составляющими факторами для увеличения производительности сверхмощных дуговых сталеплавильных электропечей.

2. Предложено математическое описание акустических характеристик дуговых разрядов, учитывающее зависимость интенсивности звуковых параметров от мгновенных значений токов, протекающих в дугах.

3. Разработана математическая модель электрических режимов работы трехфазных ДСП с учетом переноса мощности по фазам, использованием статистических характеристик и экспериментальных  $\theta$ -параметров, позволяющая получить более достоверные расчетные мгновенные значения токов в фазах электропечи.

4. Показано, что интенсификация теплообмена в рабочем пространстве ДСП за счет увеличения коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$  определяется деструктуризацией ламинарных и газодинамических пограничных слоев на поверхностях теплообмена с водоохлаждаемыми панелями и при нагреве шихты и гарнисажа за счет сопряженного воздействия вибраций и акустического излучения.

5. Создана комплексная математическая модель генерации акустической энергии дуговыми разрядами и получены параметры уровня интенсивности звука в области его генерации и на поверхностях, ограждающих рабочее пространство печей.

6. Численными методами исследовано влияние виброакустических процессов на скорость расплавления шихты в расплаве ДСП за счет вибраций. Доказано, что скорость расплавления шихты в расплаве металла и шлака изменяется пропорционально увеличению интенсивности виброакустического влияния на теплообмен. Для стали, содержащей 1% углерода, при температуре расплава  $t_p = 1600$  °С и неизменной скорости движения расплава при перемешивании максимальная скорость плавления шихты достигается при полном заглублении дуговых разрядов в жидкий металл и шлак при максимальном уровне вибраций.

7. Установлено, что акустическая и вибрационная энергии увеличивают коэффициенты теплообмена в 1,5-2 раза на поверхностях водоохлаждаемых панелей и твердой шихты, находящейся в расплаве.

8. Доказано, что для повышения выхода годного металла (снижения угара металла) необходимо использовать технологию плавки без пенистых шлаков с нагревом расплава в режимах максимальных токов для увеличения скорости нагрева при максимальных уровнях вибраций и усиления перемешивания металла осевыми струями плазмы дуговых разрядов.

9. Разработан новый метод диагностики периодов плавки в ДСП путем измерения вибрационных характеристик кожуха электропечей.

**Основные научные результаты диссертации опубликованы в следующих работах (издания из списка ВАК):**

1. Инновационные подходы к управлению электрическими режимами дуговых сталеплавильных электропечей / В.А. Сериков, Р.А. Бикеев, В.С. Чередниченко // Электрометаллургия. - 2015. - № 8. - С. 26-32

2. Акустические характеристики дуговых сталеплавильных электропечей / В.А. Сериков, Р.А. Бикеев, В.С. Чередниченко // Электрометаллургия. - 2015. - № 10. - С. 2-13.

3. Нагрев шихты в жидкометаллическом расплаве в дуговых сталеплавильных печах / В.А. Сериков, Р.А. Бикеев, В.С. Чередниченко // Электрометаллургия. - 2015. - № 1. - С. 2-6.

4. Угар металла и нагрев шихты в расплаве в дуговых электропечах / В.А. Сериков, Р.А. Бикеев, В.С. Чередниченко // *Электromеталлургия*. - 2015. - № 9. - С. 2-8.

5. Новый алгоритм управления дуговыми сталеплавильными печами с использованием вибрационных и акустических характеристик печей / В.А. Сериков, Р.А. Бикеев, В.С. Чередниченко // *Электromеталлургия*. - 2016. - № 1. - С. 11-15.

6. Влияние виброакустических процессов на теплообмен и потери металла в дуговых электропечах / В.С. Чередниченко, Р.А. Бикеев, В.А. Сериков, А.В. Чередниченко // *Электromеталлургия*. 2016. №2. С.12-19.

7. Исследование скоростей плавления шихты в расплаве в сверхмощных дуговых электропечах / В.С. Чередниченко, Р.А. Бикеев, В.А. Сериков, М.Г. Кузьмин // *Электromеталлургия*. 2016. №8 С. 2-7.

8. Особенности протекания электрических токов в сверхмощных трехфазных дуговых сталеплавильных электропечах / В. А. Сериков, Р. А. Бикеев, В. С. Чередниченко // *Черная металлургия*. - 2015. - № 7 (1387). - С. 56-61.

**Список публикаций в других журналах, сборниках научных трудов, материалах международных и всероссийских научных конференций:**

9. Моделирование акустических процессов в сверхмощных дуговых сталеплавильных электропечах / В. А. Сериков, Р. А. Бикеев, В. С. Чередниченко // *Электротехника. Электротехнология. Энергетика (ЭЭЭ-2015) = Electrical engineering. Electrotechnology. Energy (EEE-2015)*: сб. науч. тр. 7 междунар. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 9–12 июня 2015 г. В 3 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – Ч. 2. Секция «Электротехнология». – С. 22-25.

10. Исследование влияния металлических конструкций электропечей на электрические параметры их вторичных токоподводов / В. А. Сериков, Д. С. Власов // *Материалы VIII Международной научной конференции студентов «Энергия–2013»*, г. Иваново, 23-25 апреля 2013 года. - Иваново: Изд-во ИГТУ, 2013.

11. Metal structures influence on electric parameters of current lead of electrotechnological installations / D. S. Vlasov, A. I. Aliferov, R. A. Bikeev, A. N. Dobrov, V. A. Serikov // *Modelling for electromagnetic processing, : proc. of the intern. scie. colloquium, Germany, Hannover, 16-19 Sept. 2014.* – Hannover : Leibniz Univ. of Hannover, 2014. – P. 399-403.

12. Влияние рукавов электрододержателя на активное сопротивление трубошинного участка токоподвода дуговой сталеплавильной печи / Д. С. Власов, Р. А. Бикеев, В. А. Сериков, А. Н. Добров // *Энерго- и ресурсосбережение – XXI век: материалы 12 междунар. науч.-практ. интернет-конф.*, Орел, 15 марта – 30 июня 2014 г. – Орел : Госун-т-УНПК, 2014. – С. 80-82.

Отпечатано в типографии Новосибирского  
государственного технического университета  
630073, г.Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Тел./факс (383) 346-08-57  
Формат 60 x 84/16. Объем 1.25 п.л. Тираж 100 экз.  
Заказ 1359. Подписано в печать 28.09.2016 г.