

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт
институт
Электротехнология и электротехника
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В. Н. Тимофеев
подпись инициалы, фамилия
« _____ » _____ 2016 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

ПЛАВИЛЬНО-ЛИТЕЙНЫЙ КОМПЛЕКС С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ
КРИСТАЛЛИЗАТОРОМ

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

13.03.02.11 Электротехнологические установки и системы

Руководитель

подпись, дата

профессор, д.т.н.
должность, ученая степень

М. В. Первухин
инициалы, фамилия

Выпускник

подпись, дата

Э. Р. Винтер
инициалы, фамилия

Красноярск 2016

Продолжение титульного листа БР по теме «Плавильно-литейный комплекс с электромагнитным кристаллизатором»

Нормоконтролер

подпись, дата

М.В. Первухин

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1 Обзор миксеров сопротивления для приготовления алюминия.....	6
1.1 Место и назначение миксера сопротивления в плавильно-литейном комплексе.....	6
1.2 Конструкция и основные элементы миксеров сопротивления.....	7
1.3 Основные уравнения описывающие процессы теплообмена в печи сопротивления.....	13
1.4 Современные системы электрического нагрева миксеров.....	19
1.5 Выводы по главе.....	24
2 Источники питания и методы регулирования мощности электрических миксеров сопротивления.....	26
2.1 Устройства дискретного регулирования.....	26
2.2 Устройства с плавным регулированием.....	28
2.3 Законы непрерывного регулирования в печах сопротивления.....	31
2.4 Система управления миксером сопротивления емкостью 100 кг.....	36
2.5 Выводы по главе.....	39
3 Методика расчета печей сопротивления.....	41
3.1 Расчет нагревателей.....	41
3.2 Тепловой расчет футеровки.....	42
3.3 Определение тепловых потерь и номинальной мощности миксера емкостью 100 кг.....	45
3.4 Электрический расчет нагревателей миксера емкостью 100 кг.....	48
3.5 Выводы по главе.....	51
4 Математическое моделирование тепловых процессов в миксере.....	52
4.1 Программный продукт ANSYS для моделирования физических процессов.....	52
4.2 Постановка задачи.....	53
4.3 Результаты математического моделирования.....	56

4.4 Выводы по главе.....	61
Заключение.....	63
Список использованных источников.....	64

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время потребление алюминиевых сплавов неуклонно растет, более того, наблюдается тенденция замены алюминием других материалов, где это возможно. Следовательно, в условиях современной промышленности металлургическая продукция должна соответствовать высоким требованиям, предъявляемым к качеству и эксплуатационным характеристикам сплавов цветных металлов в связи с расширяющейся областью их применения. Использование современного электротехнологического оборудования позволяет повысить эффективность и продуктивность производственного процесса получения качественных сплавов.

Важным технологическим процессом в производстве алюминиевых сплавов является его приготовление, при котором обеспечиваются необходимые температура и состав расплава перед его разливкой в литейную машину. Приготовление расплава осуществляется в отражательных печах сопротивления, называемых миксерами [1, 2]. Миксер является одним из основных узлов плавления литейного комплекса, от надежности и эффективности которого зависит конечное качество алюминиевых сплавов.

Высокой надежности и эффективности миксеров возможно добиться разработкой и применением современных систем электрического нагрева, новых качественных футеровочных материалов, качественной системы регулирования и контроля температуры расплава и нагревателей, а также выбором рациональных схем источника питания и соединения нагревательных элементов.

В данной работе рассмотрены конструкции и основные элементы миксеров сопротивления. Проведен литературный и патентный обзор современных систем электронагрева. Также рассмотрены источники питания, методы и законы регулирования температурного режима в миксерах. Проведён расчет тепловых потерь через футеровку и электрический расчет нагревателей миксера емкостью 100 кг. Построена математическая модель миксера сопротивления для анализа протекания нестационарных тепловых процессов.

1 Обзор миксеров сопротивления для приготовления алюминия

1.1 Место и назначение миксера сопротивления в плавильно-литейном комплексе

Электрические миксеры сопротивления являются камерными печами сопротивления. На заводах алюминиевой промышленности используются в составе плавильно-литейного комплекса (Рисунок 1.1) и предназначены для приготовления расплава заданной температуры и химического состава.

Литейный комплекс современного алюминиевого завода, показанный на рисунке 1.1 содержит 2 миксера сопротивления 1, в которых алюминий, поступающий в ковшах с электролизных цехов, доводится до нужного состава и необходимой температуры, для интенсификации тепловых и химических процессов применяется МГД – перемешиватель 2, далее с помощью устройства подъема миксера 3 расплав разливается в систему желобов 4, из которых поступает в установку рафинирования 5, установку фильтрации 6 и литейную машину 7.

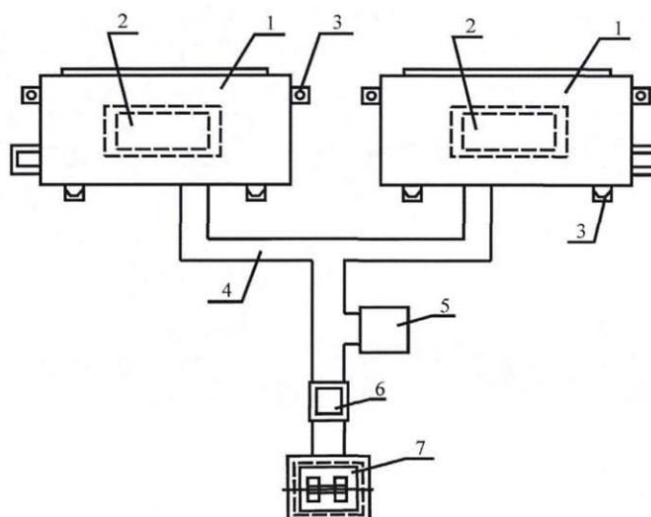


Рисунок 1.1– Плавильно-литейный комплекс

В настоящее время разрабатываются и выпускаются миксеры сопротивления очень широкой номенклатуры от малогабаритных, емкостью 50 килограмм до крупнотоннажных, емкость которых может быть до 100 тонн.

1.2 Конструкция и основные элементы миксеров сопротивления

На рисунке 1.2 приведен эскиз стационарного миксера сопротивления. Миксер представляет собой футерованную огнеупорным материалом ванну 1. Электрические трубчатые нагреватели 4 устанавливаются в своде печи, свод может быть стационарным или съемным. Расплав 3 заливается через заливочный карман, легирующие компоненты подаются через окно 2. Как правило, в настоящее время на миксере устанавливается МГД-перемешиватель 5, который позволяет автоматизировать процесс перемешивания расплава, а также равномерно распределить химический состав и температуру по объему ванны.

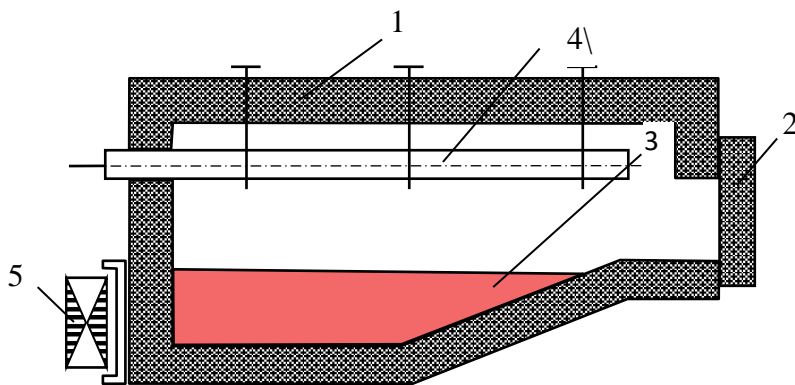


Рисунок 1.2 – Эскиз стационарного миксера

В последнее время на заводах алюминиевой и металлургической промышленности вводятся в эксплуатацию поворотные миксеры (Рисунок 1.3). В этом случае МГД-перемешиватель устанавливается под подиной печи, такой

способ перемешивания является более эффективным. Наклон печи осуществляется с помощью гидроцилиндра 6.

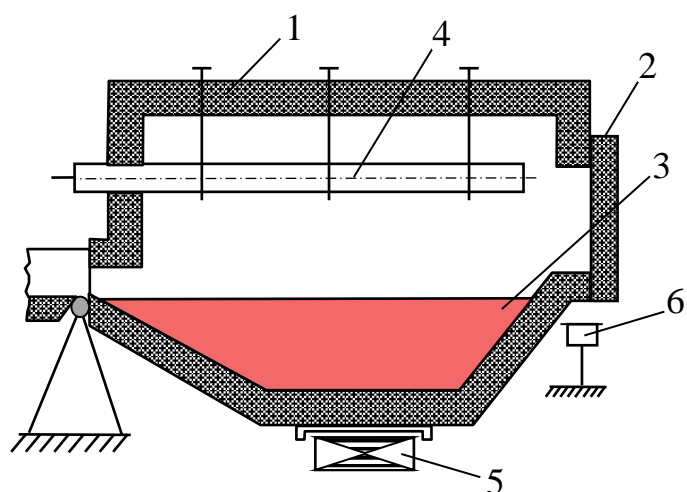


Рисунок 1.3 – Эскиз поворотного миксера

Технология приготовления расплава в должна обеспечивать заданную производительность и качество алюминиевого сплава, которое характеризуется такими критериями, как температурный перепад и содержание неметаллических включений.

Одним из основных элементов миксера является футеровка. Футеровка печи изготавливается из огнеупорных и теплоизоляционных материалов. В процессе приготовления расплава под воздействием жидкого алюминия огнеупорный слой футеровки подвержен разрушению. Вследствие этого, используемые материалы должны удовлетворять условиям механической прочности, термостойкости, химической стойкости, а также иметь малые значения теплоемкости и теплопроводности. Повысить стойкость огнеупорных материалов можно с помощью увеличения содержания в них оксида алюминия [2, 3]. В миксерах сопротивления для приготовления алюминия в качестве футеровочных материалов применяются муллитокорундовые и корундовые огнеупоры [2, 3].

На российском рынке основными производителями огнеупоров являются компании [4]: ОАО «Комбинат Магнезит», НТЦ «Бакор», Богдановичское ОАО «Огнеупоры», АО «Боровичский комбинат огнеупоров», ОАО «Суходоложский огнеупорный завод», ОАО «Семилукский огнеупорный завод», ООО «Алитер-Акси», ОАО «Динур». Крупными зарубежными производителями огнеупоров являются американские компании Minteq International, TAB Refractories, европейские компании RATH, Calderys, Mayerton, RHI AG. Такие компании как Mayerton, RHI, RATH и российская компания «Динур» выпускает огнеупорные изделия, специально предназначенные для применения в контакте с жидким алюминием.

Нагрев в электрических миксерах сопротивления в основном происходит за счет излучения с использованием подвесных ленточных или стержневых электронагревателей. Нагревательные элементы могут изготавливаться из материалов с высоким удельным сопротивлением, например, железохромоалюминиевые и нихромовые сплавы, или из тугоплавких материалов – вольфрам, молибден. Или могут же применяться неметаллические нагреватели [3].

Так как работа электрических нагревателей происходит в агрессивной среде, в результате чего они окисляются, и значительно уменьшается срок их эксплуатации. Возникает вопрос о защите электронагревателей. Возможно применять закрытые электронагреватели, к которым относят радиационные трубчатые нагреватели (Рисунок 1.4). В таком устройстве нагревательный элемент расположен в защитной трубе. Однако материал защитной трубы имеет недостаточную механическую прочность и подвержен газовой коррозии, из-за чего на трубах появляется слой оксидных отложений (Рисунок 1.5), в результате затрудняется теплоотдача с поверхности труб, в итоге сами нагревательные элементы перегреваются и выходят из строя.

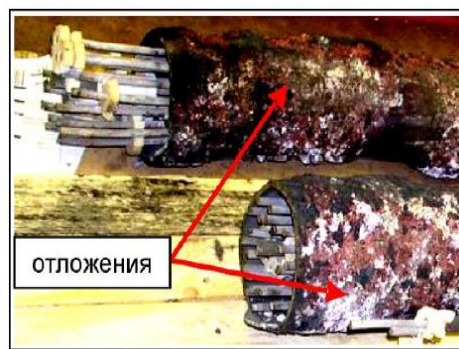


Рисунок 1.4 – Радиационные электронагреватели Рисунок 1.5 – Эксплуатационные дефекты

Одним из путей решения этой проблемы может быть изготовление защитных труб из материалов стойких к воздействиям таких элементов как фтор, натрий, хлор, марганец, фосфор. [5]. В настоящее время ведутся работы по повышению энергоэффективности электронагревателей и их срока службы [6-13].

Из неметаллических нагревателей наибольшее распространение получили карбидкремниевые нагреватели. В отличие от металлических нагревательных элементов, карбидкремниевые электронагреватели (КЭН) могут применяться при высоких температурах (до 1300-1450°). Нагреватели в процессе работы не подвергаются коррозии, мало подвержены деформации, достаточно стойки к окислению в атмосфере, легко устанавливаются в печь, имеют достаточно долгий срок эксплуатации. Поэтому карбидкремниевые нагреватели широко используются в различных высокотемпературных электрических печах.

Основные недостатки КЭН – необходимость более аккуратного использования, связанного с невысокой механической прочностью, а также старение в процессе эксплуатации. Старение проявляется в увеличении сопротивления нагревателей из-за постепенного окисления и характеризуется нестабильной скоростью изменения. Вследствие этого, силовое оборудование должно иметь возможность постепенного повышения напряжения питания при регулировании.

Большинство современных миксеров для приготовления сплавов оснащаются магнитогидродинамическими перемешивателями (МГДП) [14, 15, 16]. МГДП представляет собой линейную индукционную машину (ЛИМ) с двух- или трехфазной обмоткой, которая питается током низкой частоты (0,1-2 Гц). При включении, МГДП создает бегущее магнитное поле, которое индуцирует токи в расплаве, в результате взаимодействия тока расплава и магнитного поля индуктора возникает электромагнитное усилие, которое воздействует на частицы расплава и тем самым приводит его в движение. Бесканальный способ перемешивания, простота конструкции и надежность являются основными преимуществами МГДП.

Применение МГДП в процессе приготовления сплава в миксере позволяет [15, 16, 17]:

- автоматизировать процесс приготовления;
- значительно снизить температурный перепад между верхней и нижней частью расплава;
- сократить образование шлака;
- обеспечить однородный химический состав расплава по всему объему;
- сократить время растворения легирующих компонентов;
- снизить окисление расплава и сократить время чистки от шлаков;
- снизить растворимость водорода в алюминиевом расплаве;
- сократить время приготовления.

Крупным мировым производителем МГДП является шведско-швейцарская компания «Asea Brown Bover» (ABB), в России большой опыт в создании таких установок имеет ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики».

Важно также вести контроль температуры нагревателей и расплава, это осуществляется с помощью термопар, по показаниям которых так же производится автоматическое регулирование температуры. Так как измерение производится также в агрессивной среде, термопару помещают в защитный

кожух, что сказывается на быстродействии измерения, а также соответственно и на скорости регулирования. Для контроля высоких температур применяют платинородий-платиновые и хромель-алюмелевые термопары.

Крупным мировым производителем миксеров для приготовления расплавов, является английская фирма «Mechaterm», но она в основном специализируется на газовых миксерах [18]. Польская фирма «REMIX S. A.» изготавливает печи-миксеры с электрической системой нагрева емкостью 300, 600 и 1200 кг [19]. В России производством миксеров сопротивления для алюминия занимается завод электротермического оборудования «СИБЭЛЕКТРОТЕРМ», заводом был разработан и изготовлен ряд миксеров емкостью от 10 до 100 тонн [20]. Также крупным поставщиком данного оборудования в России является НПЦ «Магнитной гидродинамики». В 2004 году между НПЦ «Магнитной гидродинамики» и фирмой «Mechaterm» было подписано лицензионное соглашение о совместной поставке поворотных миксеров на заводы России и страны СНГ. Данным предприятием были реализованы следующие проекты по изготовлению и поставке миксеров сопротивления [21]:

- Братский алюминиевый завод – миксер емкостью 55 тонн;
- Новокузнецкий алюминиевый завод – 4 миксера емкостью 38 тонн (Рисунок 1.6);
- Красноярский алюминиевый завод – 2 миксера емкостью 100 тонн;
- Хакасский алюминиевый завод – 6 миксеров емкостью 60 тонн;
- Иркутский алюминиевый завод – 4 миксера емкостью 60 тонн;
- Тайшетский алюминиевый завод – 6 миксеров емкостью 60 тонн и 4 миксера емкостью 85 тонн;
- Богучанский алюминиевый завод – 5 миксеров емкостью 60 тонн и 4 миксера емкостью 85 тонн;
- Саяногорский алюминиевый завод – 2 миксера емкостью 70 тонн;

- Изготовление поворотного миксера емкостью 50 кг для московского завода «Спецсплав».



Рисунок 1.6 – 38 тонный миксер НПЦ «Магнитной гидродинамики» на Новокузнецком алюминиевом заводе

1.3 Основные уравнения описывающие процессы теплообмена в печи сопротивления

Печи сопротивления по уровню рабочих температур классифицируются на

1. низкотемпературные (900-1000К);
2. среднетемпературные (1000-1600К);
3. высокотемпературные (свыше 1600К).

В низкотемпературных печах теплообмен между нагревателями и нагреваемым изделием в основном осуществляется конвекцией, в средне- и высокотемпературных печах теплообмен происходит преимущественно излучением. При нагреве изделия в первую очередь прогревается его поверхность, далее посредством теплопроводности тепло передается во внутренние слои изделия. Теплопередача в футеровке происходит также посредством теплопроводности. Теплоотдача от внешних стенок печи к наружному воздуху осуществляется посредством конвекции.

Таким образом при исследовании и проектировании печей сопротивления необходимо учитывать все виды теплообмена, которые в них протекают.

Рассмотрим основные уравнения и законы, описывающие процессы теплообмена в печах сопротивления.

Уравнение теплопроводности. В основу вывода дифференциального уравнения распространения теплоты положен закон сохранения и превращения энергии. Уравнение определяет пространственно-временное распределение температурного поля. Для нестационарного процесса теплопередачи уравнение записывается следующим образом

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{c\rho} = a \nabla^2 T + \frac{q_v}{c\rho}. \quad (1.1)$$

Разберем величины, входящие в (1.1). Величина a – коэффициент температуропроводности, который характеризует скорость изменения температуры во времени в данном материале, определяется как отношение коэффициента теплопроводности материала λ к произведению теплоемкости c на плотность материала ρ . Единица измерения коэффициента температуропроводности $\text{м}^2/\text{с}$. Оператор Лапласа, представляющий собой сумму вторых производным по координатам.

Величина q_v представляет собой мощность тепловыделения от внутренних источников тепла. Например, при приготовлении расплава в миксере сопротивления, с применением МГД-перемешивания, токи, индуцируемые в расплаве будут дополнительно разогревать его.

Для стационарного процесса теплопередачи, то есть для процесса с установившейся температурой, $\partial T/\partial \tau = 0$, а также при $q_v = 0$, уравнение примет вид

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \nabla^2 T = 0. \quad (1.2)$$

Из (1.2) видно, что конфигурация стационарного температурного поля в среде с постоянными физическими свойствами и без внутренних источников теплоты не зависит от физических свойств среды, а определяется формой тела и распределением температуры на его границах.

Уравнения конвективного теплообмена. Конвективный теплообмен описывается системой уравнений неразрывности, движения и энергии.

Уравнение неразрывности (1.3) представляет собой математическую запись закона сохранения массы и формулируется следующим образом: сумма массы, втекающей в единицу объема в единицу времени, и массы, вытекающей из этого же объема за тот же промежуток времени, равна изменению массы, происходящему в единицу времени в этом объеме вследствие изменения плотности.

Для сжимаемой жидкости при нестационарных течения уравнение имеет вид

$$\frac{\partial \rho_{жк}}{\partial \tau} + \operatorname{div}(\rho_{жк} W) = 0, \quad (1.3)$$

где $\operatorname{div}(\rho_{жк} W) = \frac{\partial(\rho_{жк} \omega_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_{жк} \omega_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_{жк} \omega_z)}{\partial z}$; $\rho_{жк}$ – плотность рассматриваемой жидкости или газа; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – компоненты вектора скорости жидкости или газа W .

Для несжимаемых жидкостей, плотность которых постоянная $\rho_{жк} = \text{const}$, уравнение (1.3) примет вид

$$\frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \frac{\partial \omega_y}{\partial y} + \frac{\partial \omega_z}{\partial z} = 0. \quad (1.4)$$

Уравнение движения (1.5) представляет собой второй закон Ньютона, который применительно к элементу жидкости гласит: сила равна массе

движущейся жидкости, умноженной на ускорение. Запись уравнения имеет следующий вид

$$\rho_{ж} \frac{dW}{d\tau} = \rho_{ж} g - grad p + \mu_{ж} \nabla^2 W. \quad (1.5)$$

Разберем смысл величин, входящих в уравнение (1.5). $\rho_{ж} \frac{dW}{d\tau}$ – произведение плотности на ускорение, представляют собой силу инерции элемента единичного объема; $\rho_{ж} g$ – произведение плотности на ускорение свободного падения, равно весу элемента; $grad p$ – равнодействующая сил давления; $\mu_{ж} \nabla^2 W$ – равнодействующая сил трения.

Уравнение энергии (1.6) выводится на основании применения первого закона термодинамики в приложении к движущейся среде: изменение полной энергии некоторого объема жидкости обусловлено количеством теплоты, подводимой к объему, и внешней работой, совершаемой над жидкостью.

$$\rho_{ж} \frac{d}{d\tau} \left(h + \frac{W^2}{2} \right) = div(\lambda_{ж} grad T) + q_V + A_V + \frac{dp}{d\tau} - \frac{pd\rho_{ж}}{\rho_{ж} d\tau}. \quad (1.6)$$

Члены в уравнении (1.6) имеют следующий смысл: $\rho_{ж} \frac{d}{d\tau} \left(h + \frac{W^2}{2} \right)$ – изменение полной энергии единицы объема в единицу времени; $div(\lambda_{ж} grad T)$ – дивергенция плотности теплового потока теплопроводности; q_V – удельная мощность объемных источников тепла; A_V – работа внешних сил над единицей объема в единицу времени; $\frac{dp}{d\tau} - \frac{pd\rho_{ж}}{\rho_{ж} d\tau}$ – работа сил давления над единицей среды в единицу времени.

При умеренных скоростях течения жидкости, когда работа внешних сил A_v и кинетическая энергия $\frac{\rho_{жс} W^2}{2}$ малы по сравнению с ее энтальпией h , уравнение (1.6) примет вид

$$\rho_{жс} \frac{dh}{d\tau} = \text{div}(\lambda_{жс} \text{grad} T) + q_v. \quad (1.7)$$

Для примера, уравнение (1.7) соответствует случаю при электромагнитном перемешивании расплава в миксере.

Из решения системы уравнений неразрывности, движения и энергии при определенных условиях однозначности, определяются поле скоростей, поле температур, поле давления, поле плотности.

Законы теплового излучения получены применительно к идеальному абсолютно черному телу и термодинамическому равновесию.

Для абсолютно черного тела интенсивность излучения зависит только от длины волны и абсолютной температуры тела. Эта зависимость описывается законом Планка:

$$E_{0,\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1}, \quad (1.8)$$

где $C_1 = 3.74 \cdot 10^{-16}$ Вт/м²; $C_2 = 1.44 \cdot 10^{-2}$ м·К; λ – излучаемая длина волны, м; T – абсолютная температура, °С.

Из анализа (1.8) можно сделать выводы:

1. Абсолютно черное тело излучает при всех температурах, кроме абсолютного нуля.
2. Интенсивность излучения довольно быстро растет с увеличением температуры тела.

3. Интенсивность излучения обращается в нуль лишь при волнах с длиной волны равной нулю или бесконечности.
4. При технических температурах 1000-1500 К максимум интенсивности лежит излучения лежит в области инфракрасных лучей, а интенсивность видимой части спектра мала.
5. При увеличении температуры абсолютно черного тела максимум интенсивности излучения перемещается в сторону меньших длин волн.

Вывод 5 уточняется законом Вина (закон смещения). Произведение длины волны, соответствующей максимуму интенсивности излучения, на абсолютную температуру черного тела есть величина постоянная:

$$\lambda_{\text{макс}} T = \text{const} = B = 2900 \text{ мкм} \cdot \text{К}. \quad (1.9)$$

Подставляя из выражения (1.9) для закона Вина $\lambda_{\text{макс}} = B/T$ в (1.8), получим:

$$E_{0,\lambda} = \frac{C_1(B)^{-5}}{e^{C_2/B} - 1} T^5.$$

Следовательно, максимальная интенсивность излучения абсолютно черного тела пропорциональная пятой степени температуры.

Для определения полного количества интегрального излучения необходимо проинтегрировать формулу Планка (1.8) по длине волны от нуля до бесконечности. Тогда получится следующее выражение:

$$E_0 = \frac{8.07C_1}{C_2^4} T^4 = 5.76 \cdot 10^{-8} T^4 = \sigma_0 T^4. \quad (1.10)$$

Выражение (1.10) является законом Стефана-Больцмана, и позволяет определить полное тепловое излучение. Величина $\sigma_0 = 5.76 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}^4)$ имеет название постоянной Стефана-Больцмана.

1.4 Современные системы электрического нагрева миксеров

Как указывалось в гл.1.2, в электрических миксерах работа подвесных электронагревателей проходит в агрессивной среде, в ходе работы на их поверхности образуется слой отложений, в результате чего происходит перегрев нагревательных элементов, из-за этого снижается энергоэффективность и срок службы нагревателей. В связи с этим ведутся работы по созданию и внедрению систем электронагрева с высокими показателями эксплуатационной надежности и энергоэффективности. Рассмотрим некоторые из них.

Способом повышения тепловой эффективности нагрева металла электрическом миксере, является расположение нагревательных элементов в футеровке подины в специальных защитных кожухах (Рисунок 1.7) [22, 23, 24].

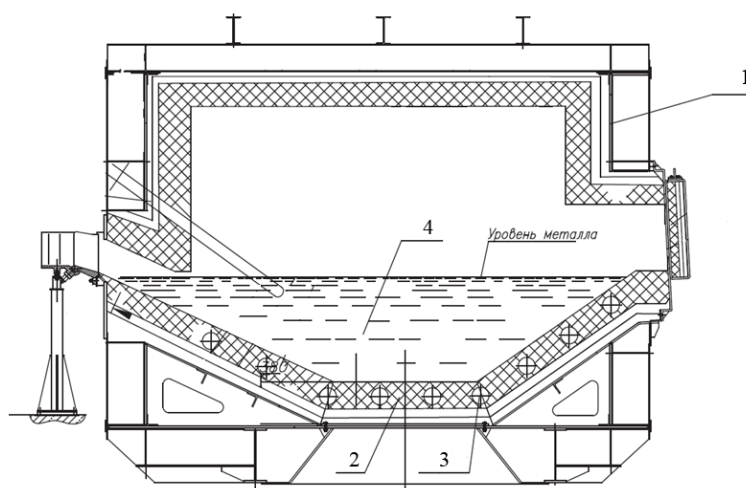


Рисунок 1.7 – Миксер с нагревателями, расположенными в футеровке подины

Особенностью данной конструкции является то, что осуществляется прямая теплопередача между нагревательными элементами 3, огнеупорным слоем футеровки 2 и расплавом 4 в ванне миксера. Достоинствами данной системы нагрева является то, что нагревательные элементы защищены от влияния агрессивной среды, вследствие чего, обеспечивается их стабильный температурный режим и увеличивается срок службы. Так же снижаются

тепловые потери, за счет уменьшения размеров рабочего пространства миксера, и градиент температур между верхним и нижним слоем расплава, за счет интенсивного конвективного теплообмена в расплаве. Более того, миксер может применяться для расплава твердой шихты.

Для повышения эксплуатационной надежности печи предложена система подового электронагрева, изображенная на рисунке 1.8 [25]. В подине 4 футерованной ванны 1, расположен теплопроводный блок 3, который через расплав контактирует с токоподводящим электродом 5, имеющим полость для охлаждающей жидкости 10 и систему охлаждения 11. От источника электрической энергии 8, к токоподводящему электроду 6 подсоединяется токопровод 7, токопровод 9 источника подсоединяется к токоподводящему электроду 5. Температурный режим токоподводящего электрода 5 поддерживается на требуемом уровне системой автоматического регулирования 12, регулирующей расход охлаждающей жидкости.

В качестве материала огнеупорного теплопроводного блока используются электропроводящие резистивные материалы на основе углерода, обладающие высокой температурой плавления: карбид кремния, силицированный графит.

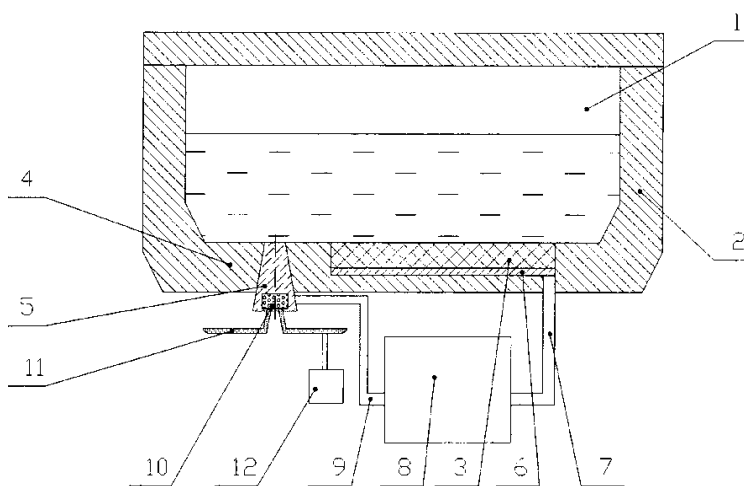


Рисунок 1.8 – Миксер с подовым нагревателем

В результате математического моделирования [6], было показано, что эксплуатационная надежность миксера может быть значительно повышена, за счет увеличения надежности нагревателя. Однако интенсификация тепломассобменных процессов в ванне электрических миксеров с электронагревателями в подине является причиной значительного загрязнения металла неметаллическими включениями (например, окисью алюминия) при взаимодействии жидкого алюминия со шлаком и атмосферой.

Возможно применение комбинированного нагрева [26], при котором используются сводовый и подовый нагреватели (Рисунок 1.9).

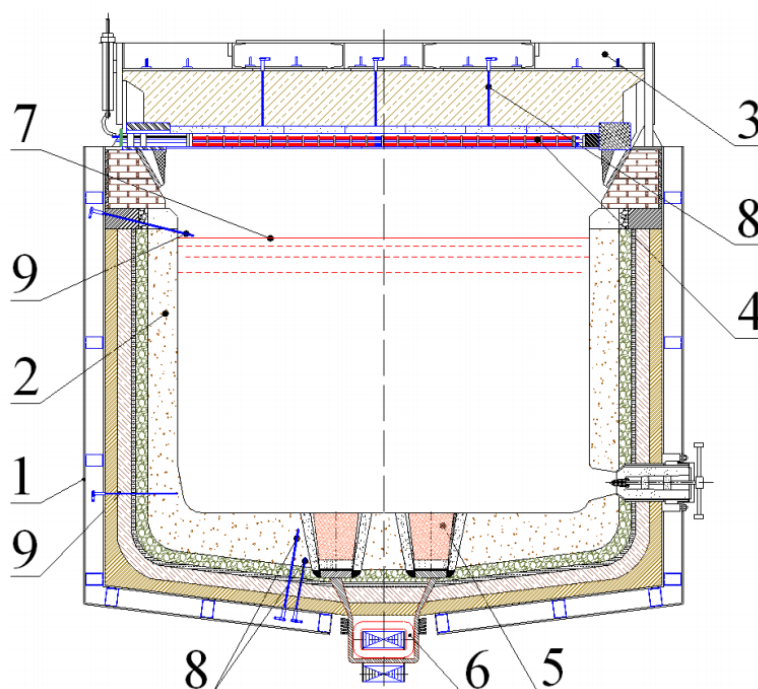


Рисунок 1.9 – Миксер с комбинированным нагревом

Конструктивно миксер состоит из металлического каркаса 1, футеровки 2, свода 3, сводового электронагревателя 4, подового электронагревателя 5, источника питания 6, термопар 8 фиксирующих температуру электронагревателей, и термопары 9 фиксирующей температуру расплава 7.

Такой миксер работает в 3 цикла. На стадии приготовления расплава используется подовый электронагреватель, позволяющий максимально интенсифицировать тепломассообменные процессы в ванне. На стадии выдержки используется сводовый электронагреватель, в этом случае неметаллические примеси оседают на подине. На стадии литья работают оба электронагревателя, в результате чего снижается температурный перепад и содержание неметаллических включений в объеме.

В результате исследований [7, 8], было установлено что миксер с комбинированным нагревом позволяет значительно повысить энергоэффективность нагрева, снизить неравномерность температурного перепада в расплаве, управлять распределением неметаллических включений в ванне на стадиях нагрева, выдержки и литья в соответствии с заданными технологическими требованиями.

Для повышения газовой и коррозионной стойкости, и энергоэффективности предложена система электронагрева с нагревателями замурованного типа (Рисунок 1.10, а, б) [27]. Особенностью таких электронагревателей является то, что нагревательные элементы 1 располагаются в огнеупорном электроизоляционном блоке 2, выполненного из высокотеплопроводного материала, на рисунке 1.10, б показан нагреватель, огнеупорный электроизоляционный блок которого выполнен арочным. Электрический нагреватель имеет условное название «светящийся свод».

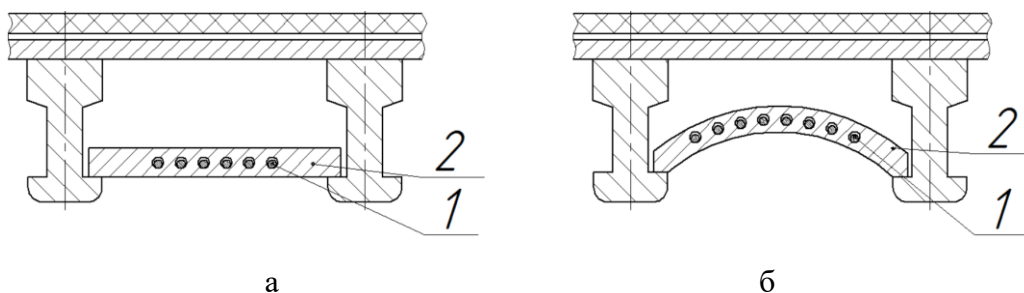


Рисунок 1.10 – Электронагреватель замурованного типа

В результате исследований [9-12], было установлено что электрический нагреватель конструкции «светящийся свод» позволяет: увеличить эффективную излучаемую мощность на поверхность расплава в 1.5-2 раза, за счет увеличения площади излучаемой поверхности на (30-40) %; снизить температуру нагревательных элементов за счет уменьшения зашлаковывания излучающей поверхности, в результате чего значительно увеличивается срок службы электронагревателя.

На рисунке 1.11, а показана трехмерная модель нагревателя с видом на излучающую поверхность 2 огнеупорного блока 1. На рисунке 2.5, б показан нагреватель в ходе промышленных испытаний на миксере САМ-5 (ООО «ЗМИ Сиблента»).

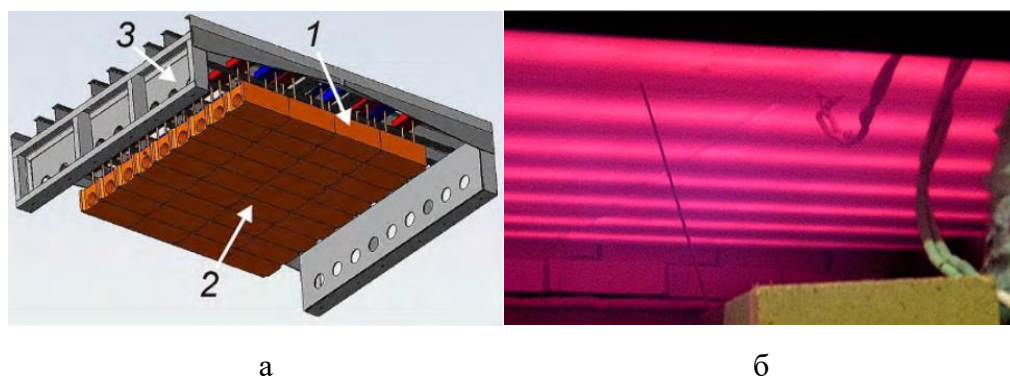


Рисунок 1.11 – Вид нагревателя «Светящийся свод»

На рисунке 1.12 представлены результаты математического моделирования из [9]. Были получены зависимости температурного перепада между поверхностью расплава и поверхностью свода, и температуры излучающей поверхности от температуры нагревательных элементов. Видно, что при использовании теплопроводного слоя из материала с коэффициентом теплопроводности $4...7 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ – материал на основе корундокарбидокремниевого бетона, температура излучающей поверхности может быть повышена, а температурный перепад между поверхностью расплава

и излучающей поверхностью свода может быть уменьшен на 80 °С (рисунок 2.6, б).

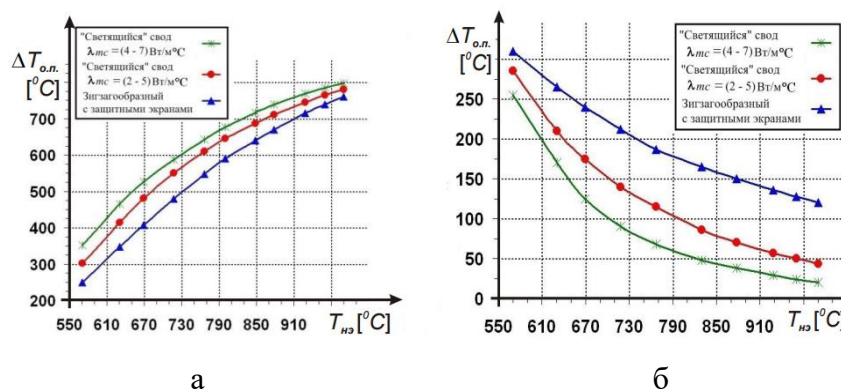


Рисунок 1.12 – Графики зависимостей: температуры отражающей поверхности $T_{ол}$ от температуры нагревательного элемента $T_{нэ}$ (а) и температурного перепада $\Delta T_{нагр}$ от температуры нагревательного элемента $T_{нэ}$ (б)

1.5 Выводы по главе

1. Рассмотрев место и назначение в плавильно-литейном комплексе, конструкции и основные элементы миксеров сопротивления, можно сделать вывод, что миксер является сложным технологическим оборудованием, от надежности и эффективности которого зависит конечное качество отливаемых слитков.
2. Показано преимущество применения МГД - перемешивателя в процессе приготовления сплава в миксере сопротивления, одними из которых являются сокращение времени приготовления, автоматизирование процесса перемешивания и снижение температурного перепада по глубине ванны.
3. Показано, что важную роль в надежности и энергоэффективности миксера играют система электрического нагрева, поэтому важно в процессе приготовления вести контроль температуры и осуществлять ее регулирование не только сплава, но и нагревательных элементов.

4. Обзор современных систем электрического нагрева показал, что надежность и энергоэффективность миксера сопротивления можно повысить, путем отделения нагревательных элементов от внутripечной агрессивной среды, исключив зашлаковывание поверхности и, тем самым снизив температуру на нагревателях. Более того при применении подового нагревателя возникает интенсивное конвективное движение частиц расплава в ванне, а при применении нагревателя «светящийся свод» возможно увеличить полезную излучающую мощность за счёт увеличения излучающей поверхности.

2 Источники питания и методы регулирования мощности электрических миксеров сопротивления

Для миксеров сопротивления могут применяться различные источники питания в зависимости от вида регулирования мощности нагрева. Устройства для регулирования мощности бывают [28-33]:

1. Дискретные;
2. Устройства с плавным регулированием (непрерывные).

2.1 Устройства дискретного регулирования

Дискретное регулирование может применяться при использовании трансформаторов с регулировочными ступенями, где переключение между ступенями напряжения осуществляется с помощью контакторов. Так же возможно дискретно изменять мощность, переключая соединение питающих обмоток трехфазного трансформатора из треугольника в звезду или наоборот. В этом случае регулирование является сравнительно грубым, так как изменяется подводимое напряжение, а мощность миксера пропорциональна квадрату этого напряжения.

В трехфазных печах для ступенчатого регулирования мощности возможно переключение нагревательных элементов с треугольника в звезду (Рисунок 2.1, а), мощность при этом изменится в 3 раза. В однофазных печах можно переключить нагревательные элементы с параллельного соединения на последовательное (Рисунок 2.1, б), мощность при этом изменится в 4 раза. Преимуществом такого метода является простота и дешевизна, однако также является довольно грубым и в этом случае возможно получить лишь несколько ступеней мощностей.

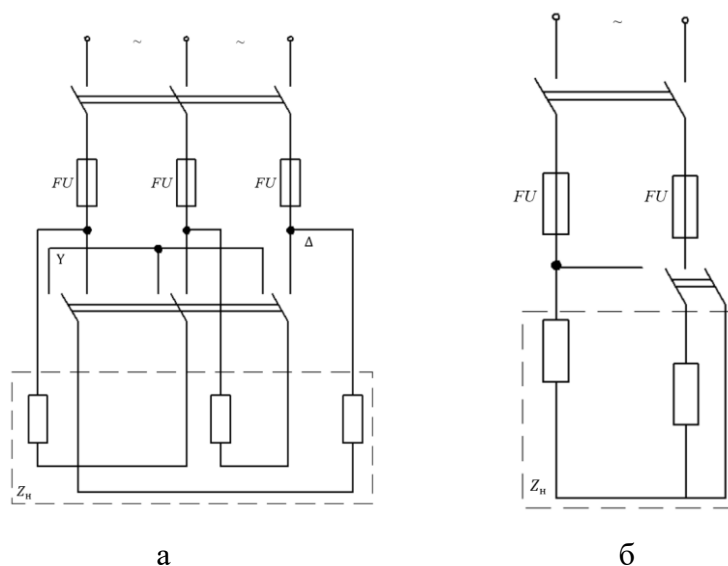


Рисунок 2.1 – Регулирование переключением нагревателей

Широко применяется метод позиционного регулирования, когда миксер периодически работает на номинальной мощности, а затем полностью отключается (двухпозиционное регулирование), либо периодически может работать на номинальной мощности, частичной мощности, а также полностью отключаться (трехпозиционное регулирование). Переключение осуществляется электромагнитным контактором, либо тиристорным переключателем, который имеет большую частоту переключений и больший срок службы по сравнению с электромагнитным контактором. При двухпозиционном регулировании в идеальном случае, когда в системе «регулятор-печь» отсутствует динамическое запаздывание, температура изменится по «пилообразной» кривой около заданного значения (Рисунок 2.2). Средняя мощность при этом зависит от соотношения интервалов времени во включенном Δt_1 , и выключенном Δt_2 состояниях. Но в реальном случае могут возникать значительные колебания температуры из-за инерционности датчика температуры.

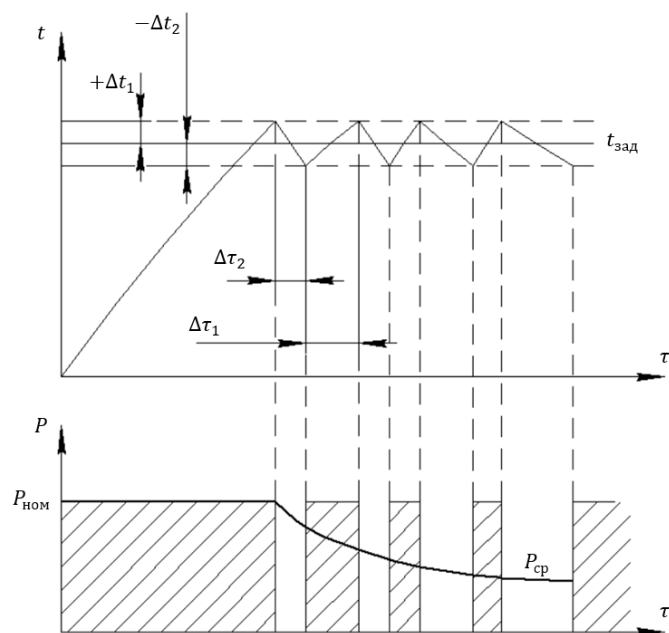


Рисунок 2.2 – Идеализированная схема работы двухпозиционного регулятора

Этот метод эффективен с энергетической точки зрения, так как при этом отсутствуют дополнительные потери и не оказывается вредного влияния на питающую сеть.

2.2 Устройства с плавным регулированием

Плавное регулирование может осуществляться с помощью регулировочных трансформаторов, изменением индуктивной связи между первичной и вторичной обмотками. Это осуществляется с помощью подвижной вторичной обмотки относительно неподвижной первичной обмотки. Для плавного регулирования может применяться индукционный регулятор, представляющий собой вертикальную асинхронную машину с заторможенным ротором. Регулирование напряжения в индукционных регуляторах осуществляется изменением угла поворота обмотки ротора относительно неподвижной обмотки статора. Достоинством регулировочных трансформаторов и индукционных регуляторов является синусоидальная форма

выходного напряжения, однако они имеют невысокое быстродействие, а также малый коэффициент мощности из-за потребления реактивной мощности.

В настоящее время, применявшиеся ранее источники питания на магнитных усилителях вытеснены тиристорными преобразователями. На сегодняшний день тиристорные регуляторы широко применяются для управления электротехнологическими установками. Для управления миксером сопротивления используются однофазные (Рисунок 2.3, а) и трехфазные (Рисунок 2.3, б) тиристорные регуляторы, с подключением тиристоров по встречно-параллельной схеме.

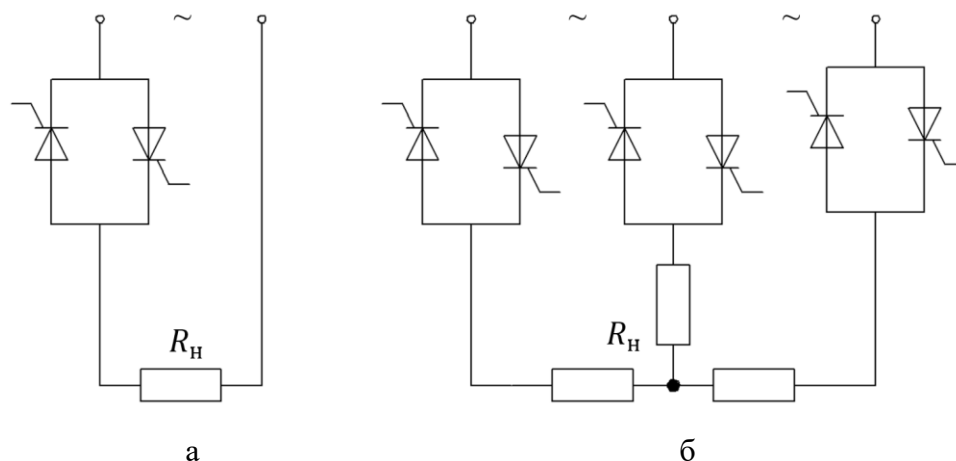


Рисунок 2.3 – Включение тиристоров по встречно-параллельной схеме

В тиристорных преобразователях применяются фазоимпульсный и широтно-импульсный методы регулирования. При фазоимпульсном управлении выходное напряжение регулируется изменением угла открытия тиристоров α (Рисунок 2.4, а). При широтно-импульсном управлении напряжение регулируется изменением длительности включенного состояния тиристоров λ при постоянном периоде регулирования T_p , т. е. среднее напряжение зависит от относительной продолжительности включения $\gamma = \lambda / T_p$. Широтно-импульсное регулирование (ШИР) может быть с повышенной частотой коммутации (Рисунок 2.4, б), когда $f_k > f_c$ (где f_c частота питающего напряжения) или с пониженной частотой коммутации (Рисунок 2.4, в), когда $f_k < f_c$.

При фазоимпульсном регулировании значительно искажается форма кривой тока (появление в сети высших гармоник), также недостатком такого способа является малый коэффициент мощности. При использовании ШИР энергетические характеристики несколько выше, чем при фазоимпульсном регулировании, однако при использовании ШИР с пониженной частотой коммутации появляются гармоники тока ниже частоты питающей сети, которые вызывают низкочастотные колебания мощности и температуры. При ШИР с повышенной частотой коммутации присутствуют гармоники с частотой выше частоты сети.

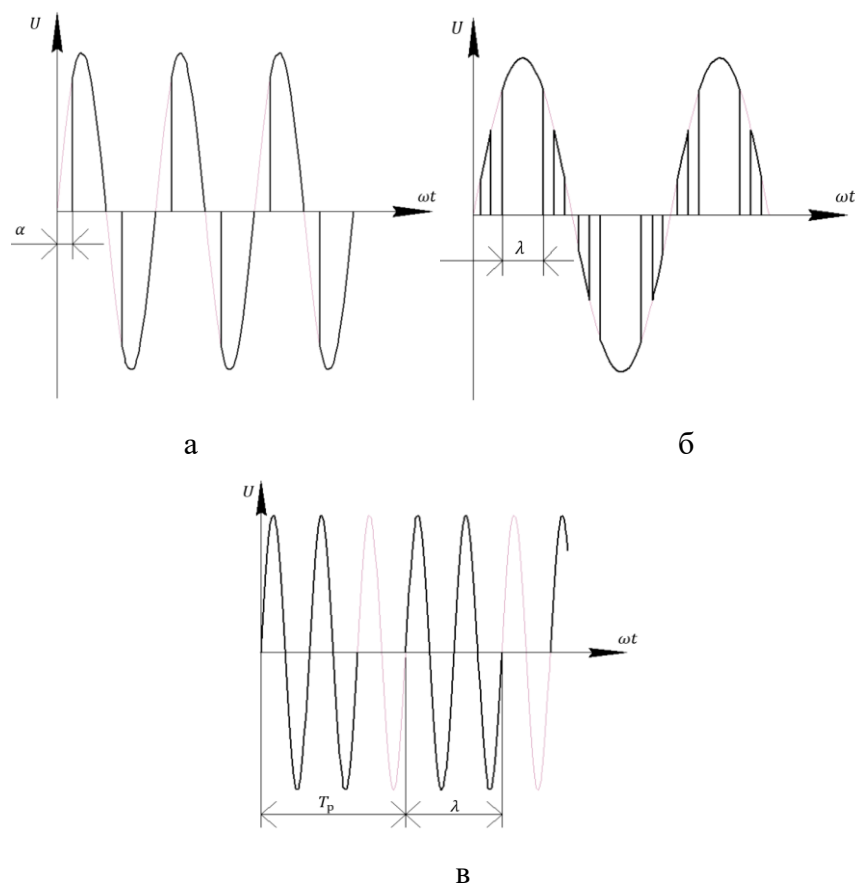


Рисунок 2.4 – Фазоимпульсный (а) и широтно-импульсный (б, в) методы регулирования

При групповом режиме работы широтно-импульсных регуляторов энергетические показатели могут быть существенно выше, так как создаваемые

одним тиристорным преобразователем реактивные токи, а также токи высших и низших гармоник, в большей или меньшей степени будут компенсироваться токами другого тиристорного преобразователя [31,33]

2.3 Законы непрерывного регулирования в печах сопротивления

В зависимости от закона регулирования, регуляторы непрерывного действия подразделяют на [34, 35]:

- 1) регуляторы пропорционального действия (П-регуляторы);
- 2) регуляторы интегрального действия (И-регуляторы);
- 3) регуляторы пропорционально-интегрального действия (ПИ-регуляторы);
- 4) регуляторы пропорционально-интегрально-дифференциального действия (ПИД-регуляторы).

П-регуляторы имеют линейную связь между регулирующим воздействием и регулируемым параметром (температурой), у них хорошее быстродействие, так как угол сдвига фаз между входным и выходным сигналом отсутствует.

$$y = k_p x \text{ или } \frac{dy}{dt} = k_p \frac{dx}{dt},$$

где k_p – коэффициент передачи регулятора.

Передаточная функция П-регулятора:

$$W(p) = k_p.$$

П-регуляторы работают устойчиво, если потребление мощности миксером не меняется, когда потребление мощности миксером изменяется, то процесс регулирования будет характеризоваться статической ошибкой $\Delta t_1 = t_3 - t$, т. е

отклонением температуры t от заданного значения t_3 в установившемся режиме. При большом коэффициенте передачи, статическая ошибка будет малой, но переходный процесс будет протекать в виде медленно затухающих колебаний, при малом коэффициенте передачи переходный процесс будет аperiodическим с большой статической ошибкой. Переходные процессы в системе с П-регулятором при различных коэффициентах передачи изображены на рисунке 2.5.

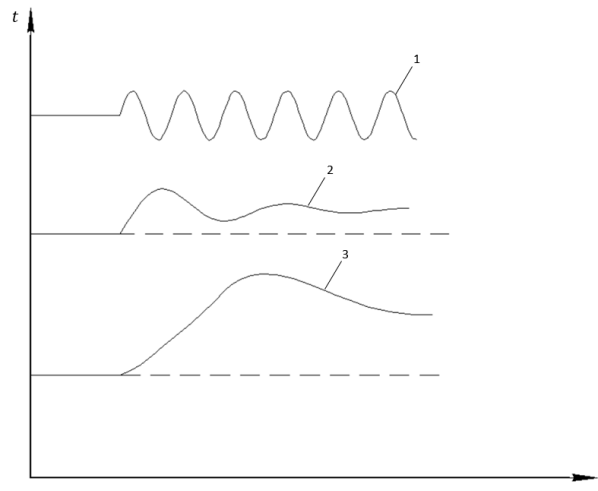


Рисунок 2.5 – Переходные процессы в системе с П-регулятором при 1) большом k_p ; 2) среднем k_p ; 3) малом k_p ;

И-регуляторы осуществляют изменение подводимой к миксеру мощности со скоростью пропорциональной отклонению температуры от ее заданного значения.

$$y = \frac{1}{T_u} \int x dt \quad \text{или} \quad \frac{dy}{dt} = \frac{1}{T_u} x,$$

где T_u – постоянная интегрирования.

Передаточная функция И-регулятора имеет вид

$$W(p) = \frac{1}{T_u p}.$$

И-регулятор осуществляет регулирование без статической ошибки, что является его существенным плюсом. Сдвиг фаз между выходным и входным сигналами регулятора равен $-\pi/2$, т. е. регулирующее воздействие будет запаздывать относительно входного сигнала, а это значит, что процесс регулирования будет связан с колебаниями температуры около заданного значения, причем чем больше значение $1/T_u$, тем больше будут колебания в системе регулирования, сам процесс регулирования протекает довольно медленно и характеризуется большой динамической ошибкой. Переходные процессы в системе с И-регулятором показаны на рисунке 2.6 для различных значений постоянной интегрирования.

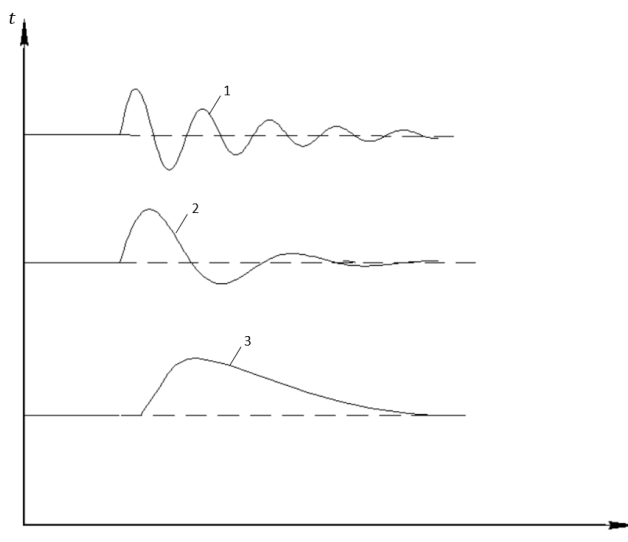


Рисунок 2.6 – Переходные процессы в системе с И-регулятором при 1) малом T_u ; 2) среднем T_u ; 3) большом T_u

ПИ-регулятор совмещает в себе П- и И- законы регулирования и выражается уравнением:

$$y = k_p x + \frac{1}{T_u} \int x dt.$$

Передаточная функция ПИ-регулятора

$$W(p) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_u p} \right).$$

Угол сдвига фаз между выходной и входной величинами находится в пределах $0 \leq \varphi \leq -\pi/2$, таким образом ПИ-регулятор по быстродействию несколько уступает П-регулятору, однако из-за введения в систему интегральной составляющей будет отсутствовать статическая ошибка в процессе регулирования. Характер переходного процесса будет определяться параметрами T_u и k_p . При уменьшении k_p и увеличении T_u переходный процесс приближается к апериодическому (Рисунок 2.7, кривая 3), при этом увеличивается время регулирования и статическая ошибка, при увеличении k_p и уменьшении T_u процесс будет иметь колебательный характер, при этом время переходного процесса увеличивается (Рисунок 2.7, кривая 1), оптимальный переходный процесс регулирования достигается правильной настройкой параметров k_p и T_u (Рисунок 2.7, кривая 2).

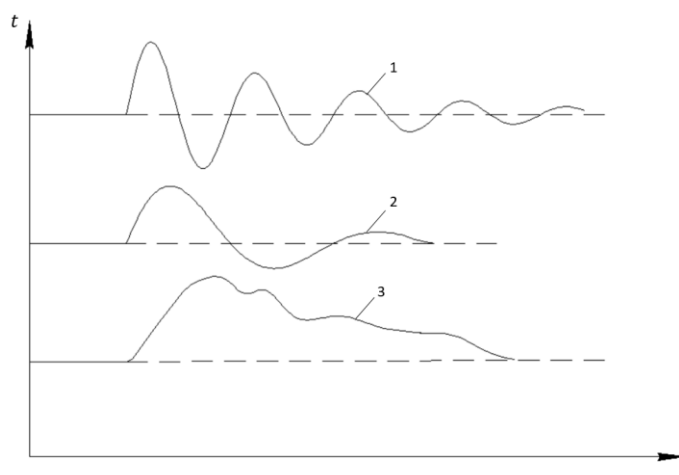


Рисунок 2.7 – Переходные процессы в системе с ПИ-регулятором при различных k_p и

T_u

ПИД-регулятор нашел наиболее широкое применение в системах автоматического регулирования мощности электрических печей. Он осуществляет изменение мощности миксера пропорционально отклонению, интегралу и скорости изменения температуры. Описывается уравнением

$$y = k_p \left(x + \frac{1}{T_u} \int x dt + T_d \frac{dx}{dt} \right).$$

Передаточная функция регулятора

$$W(p) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_u p} + T_d p \right),$$

где T_d – постоянная дифференцирования.

Включение в закон производной позволяет регулятору реагировать на то, как быстро происходит отклонение температуры от заданного значения. Исходя из тенденции отклонения температуры и оценки значительности возмущающего воздействия, регулятор заранее изменяет регулирующее воздействие соответствующим образом до возникновения большого рассогласования, иначе говоря, работает с предварением. Это приводит к уменьшению динамической ошибки, колебательности и времени регулирования.

Преимущество ПИД-регулятора по сравнению с П- и ПИ-регуляторами состоит в том, что процесс регулирования протекает с меньшей динамической ошибкой, и заканчивается значительно быстрее, что показано на рисунке 2.8.

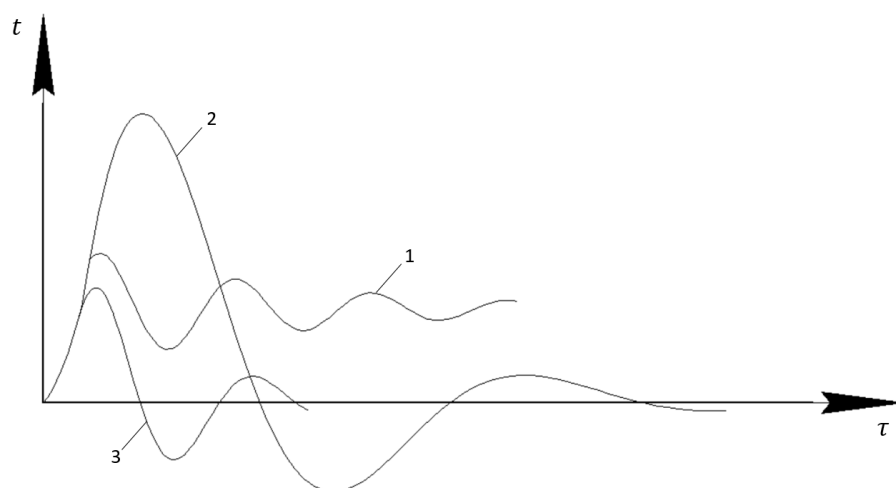


Рисунок 2.8 – Переходные процессы в системе с 1) П-; 2) ПИ- и 3) ПИД-регуляторами

2.4 Система управления миксером сопротивления емкостью 100 кг

Плавильно-литейный комплекс для получения высококачественных алюминиевых слитков показан на рисунке 2.9, а, в состав которого входят плавильная индукционная тигельная печь 1, электрический миксер для приготовления 2 и литейная машина с электромагнитным кристаллизатором.

На рисунке 2.9, б показан эскиз электромагнитного кристаллизатора (ЭМК), принцип работы которого в следующем, жидкий металл 1 через литейную оснастку 2 подается в индуктор 3, под действием электродинамических сил и сил поверхностного натяжения металл удерживается от растекания. Под действием воды, подаваемой из охладителя в магнитном поле, формируется слиток 4, который постепенно отводится вниз.

За счет быстрых скоростей охлаждения, отсутствия контакта поверхности с кристаллизатором и электромагнитного перемешивания жидкой фазы в процессе кристаллизации ЭМК позволяет получать высококачественные слитки с уникальными физико-механическими свойствами.

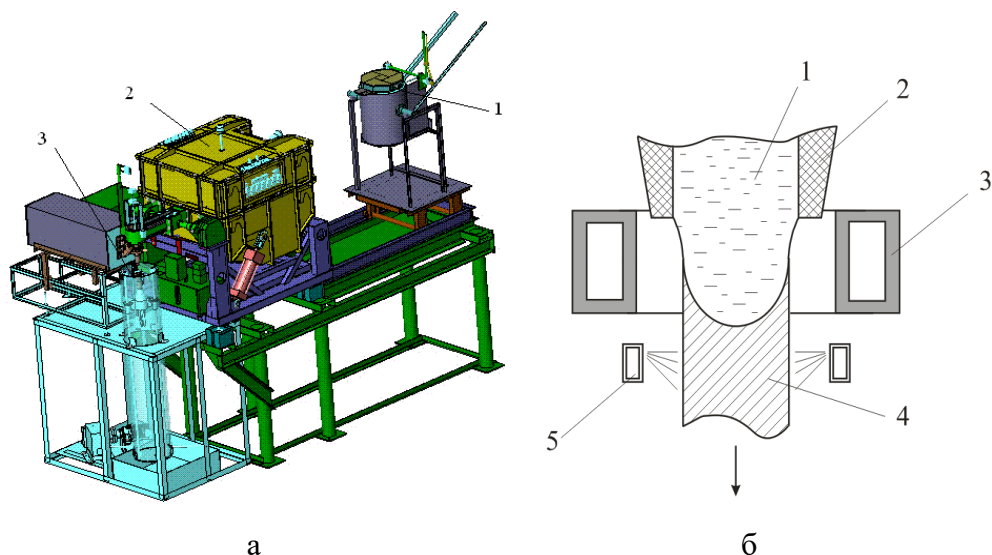


Рисунок 2.9 – Плавильно-литейный комплекс для получения высококачественных слитков (а) и электромагнитный кристаллизатор (б)

На рисунке 2.10 показано сечение миксера емкостью 100 килограмм для приготовления алюминиевых сплавов, входящего в состав комплекса. Основными элементами конструкции являются: огнеупорный слой 1, который контактирует с жидким металлом 3, теплоизоляционный слой 2. В своде печи располагается нагревательный блок 4, в котором устанавливаются карбидокремниевые нагреватели 5 в количестве 9 штук. Заливочный карман закрыт дверцей 6. В печь заведены две термопары 7, одна из которых располагается в расплавленном металле, а другая предназначена для измерения температуры нагревательных элементов и располагается в своде.

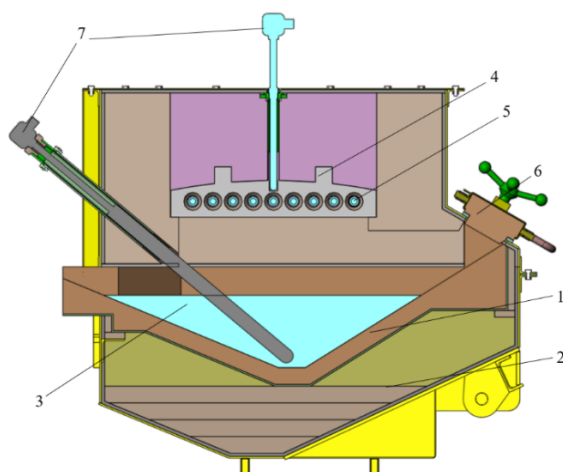


Рисунок 2.10 – Сечение миксера сопротивления емкость 100 кг

Структурная схема регулирования температуры металла изображена на рисунке 2.11. Для контроля температуры свода (ТС) в нем расположена термопара. Для измерения температуры металла (ТМ) в систему заведён сигнал от термопары расположенной в ванне печи. Таким образом, имеется два измерительных устройства и один исполнительный элемент. Задача алгоритма управления температурой металла – стабилизировать и поддерживать ТМ в соответствии с заданной уставкой температуры металла (У_{ТМ}). Разность У_{ТМ} и ТМ подаётся на регулятор температуры металла (Р_{ТМ}). Сигнал на выходе Р_{ТМ} в сумме с У_{ТМ} определяет уставку температуры свода (У_{ТС}) (2.1).

$$U_{тс} = U_{тм} + f_{рм}(U_{тм} - ТМ). \quad (2.1)$$

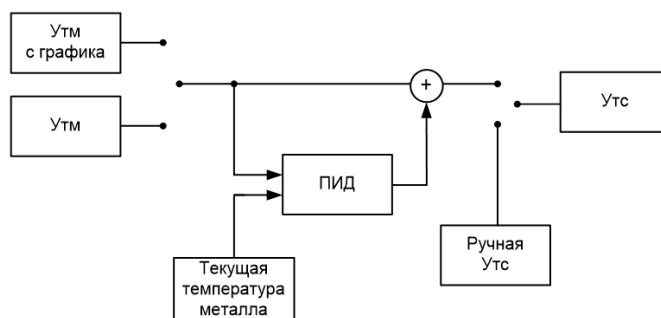


Рисунок 2.11 – Структурная схема регулирования температуры металла

Особенностью системы регулирования в данной печи является то, что конец термопары для измерения температуры нагревательных элементов располагается в нагревательном своде на некотором расстоянии от нагревателя, и, следовательно, измеряется температура этой точки, а не самих нагревателей. Поэтому необходимо знать перепад температур между этой точкой и нагревательным элементом для точного регулирования температуры.

Для наклона печи, с целью разливки металла в литейную машину используется электрический привод с червячной передачей, показанный на рисунке 2.12.

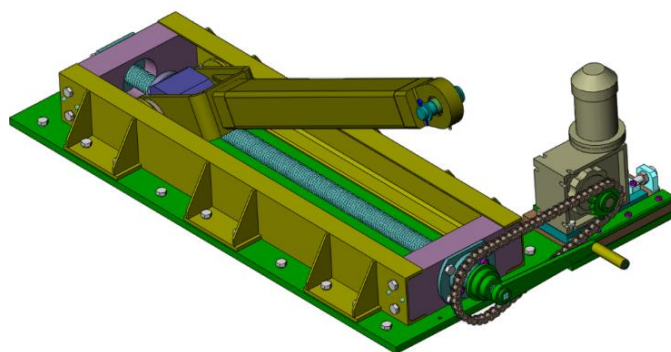


Рисунок 2.12 – Электрический привод для наклона миксера

Алгоритм стабилизации уровня металла обеспечивает поддержание заданного уровня металла в желобе. Для измерения уровня металла в желобе используется лазерный триангуляционный датчик. Структурная схема стабилизации уровня металла в желобе показана на рисунке 2.13

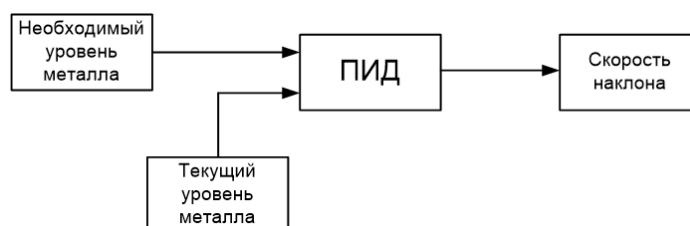


Рисунок 2.13 – Структурная схема стабилизации уровня металла в желобе

При включенном процессе стабилизации уровня металла в желобе запускается алгоритм ПИД-регулирования уровня металла. Разность необходимого и текущего уровня поступает на ПИД-регулятор, сигнал с выхода которого управляет скоростью наклона для подсистемы наклона печи.

2.5 Выводы по главе

1. Из рассмотренных источников питания миксеров сопротивления, на сегодняшний день наиболее широко применяются тиристорные преобразователи с фазоимпульсным или с широтно-импульсным регулированием. Недостатком фазоимпульсного регулирования по сравнению с широтно-импульсным является малый коэффициент мощности и искажение кривой напряжения, однако при применении ШИР могут возникнуть колебания температуры на нагревательных элементах.
2. Показано, преимущество применения ПИД – закона для регулирования температуры в миксере, за счет того, что переходные процессы в системе протекают быстрее и имеют меньшую динамическую ошибку по сравнению с П- и ПИ- регуляторами.
3. Рассмотрена система управления миксером сопротивления для приготовления алюминиевых сплавов емкостью 100 килограмм. Приведены структурные схемы регулирования температуры металла и

3 Методика расчета печей сопротивления

3.1 Расчет нагревателей

Для расчета пользуются понятием допустимой удельной поверхностной мощности нагревателя, т. е. мощности, выделяющейся с единицы поверхности нагревателя [1, 2, 3,].

$$W = \frac{P}{F_{нагр}},$$

где P – выделяемая нагревателем мощность, Вт; $F_{нагр}$ – площадь поверхности нагревателя, м².

Для ее определения вводится понятие идеального нагревателя. Он представляет собой нагреватель, который образует с изделием (расплавом) две бесконечно параллельные плоскости, при этом принимается, что тепловые потери равны нулю. Условно считается, что нагреватель излучает тепло не своей полной поверхностью, а некоторой условной «активной» поверхностью.

При теплообмене излучением

$$W_{ид} = C_{пр} \left[\left(\frac{T_{нагр}}{100} \right)^2 - \left(\frac{T_{изд}}{100} \right)^2 \right],$$

где $T_{нагр}$ – температура нагревателя, К; $T_{изд}$ – температура поверхности изделия, К; $C_{пр} = 5,76 / (1/\epsilon_{изд} + 1/\epsilon_{нагр} - 1)$ приведенный коэффициент излучения системы идеальный нагреватель-загрузка; $\epsilon_{изд}$, $\epsilon_{нагр}$ – относительные коэффициенты излучения материалов соответственно изделия и нагревателя.

Связь между удельными поверхностными мощностями идеального и реального нагревателей:

$$W = W_{ud} \alpha_{эф} \alpha_{\Gamma} \alpha_c \alpha_p,$$

где $\alpha_{эф}$ – коэффициент, характеризующий эффективность излучения реальной системы нагревателей при минимально допустимых относительных витковых расстояниях; α_{Γ} – коэффициент шага, зависящий от относительных витковых расстояний; α_c – коэффициент, учитывающий влияние на W приведенного коэффициента излучения $C_{пр}$; α_p – коэффициент, зависящий от отношения расчетной поверхности изделий к поверхности стен, занятых нагревателями.

Для расчёта печей пользуются графиками удельных поверхностных мощностей идеального нагревателя [2].

При определении W_{ud} под температурой нагревателя подразумевается максимальная температура, которая определяет срок службы нагревателя из условий окисления, например, для печей периодического действия, это температура в момент выдержки, в печах непрерывного действия – температура в конце каждой зоны.

Мощность нагревателей

$$P = WF_{раб}.$$

После определения мощности нагревателя, производится выбор схемы соединения нагревательных элементов, после чего определяется напряжение питания и рассчитывается ток в нагревателе.

3.2 Тепловой расчет футеровки

При тепловом расчете многослойной футеровки при известных температурах рабочего пространства и окружающей среды выбираются материалы каждого слоя, определяются их толщина и ориентировочные коэффициенты теплопроводности, рассчитываются коэффициенты теплоотдачи

для внутренней и наружной поверхности футеровки. После чего, рассчитывается тепловой поток для различных участков печи (боковая стенка, подина, свод).

Для примера рассмотрим плоскую трехслойную стенку с конвективным теплообменом на внешних поверхностях. Плотность теплового потока через стенку будет определяться выражением

$$q = \frac{t_{раб} - t_{окр}}{\frac{1}{\alpha_{вн}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_{нар}}}, \quad (3.1)$$

где $t_{раб}$ – температура рабочего пространства печи; $t_{окр}$ – температура окружающей среды; $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ – толщина 1-го, 2-го и 3-го слоев футеровки; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – коэффициент теплопроводности 1-го, 2-го и 3-го слоев; $\alpha_{вн}, \alpha_{нар}$ – коэффициенты теплоотдачи внутренней и наружной поверхности соответственно.

Вычисляется температура на внутренней поверхности стенки

$$t_{c1} = t_{раб} - \frac{q}{\alpha_{вн}}. \quad (3.2)$$

Температура на границе первого и второго слоев футеровки

$$t_{1,2} = t_{c1} - \frac{q\delta_1}{\lambda_1}. \quad (3.3)$$

Температура на границе второго и третьего слоев

$$t_{2,3} = t_{1,2} - \frac{q\delta_2}{\lambda_2}. \quad (3.4)$$

Температура на внешней поверхности стенки

$$t_{c2} = t_{2,3} - \frac{q\delta_3}{\lambda_3}. \quad (3.5)$$

Далее рассчитывается средняя температура каждого слоя футеровки и уточняются коэффициенты теплопроводности

$$t_{cp1} = \frac{t_{\text{вн}} + t_{1,2}}{2},$$

$$t_{cp2} = \frac{t_{1,2} + t_{2,3}}{2},$$

$$t_{cp3} = \frac{t_{2,3} + t_{c2}}{2}.$$

После уточнения коэффициентов теплопроводности каждого слоя, пересчитывается плотность теплового потока по формуле (3.1).

Затем проверяются температуры на промежуточных поверхностях с пересчитанной плотностью теплового потока q' и уточненными коэффициентами теплопроводности по формулам (3.2-3.5).

Вычисляется относительная погрешность для полученных температур

$$\varepsilon_1 = \frac{t_{1,2} - t'_{1,2}}{t_{1,2}},$$

$$\varepsilon_2 = \frac{t_{2,3} - t'_{2,3}}{t_{2,3}}.$$

Погрешность не должна превышать 5%, если значение погрешности превышает это значение, задаются новыми значениями промежуточных температур, близких к полученным, и повторяют расчет начиная с формулы (3.1).

3.3 Определение тепловых потерь и номинальной мощности миксера емкостью 100 кг

Эскиз футеровки миксера приведен на рисунке 3.1. В данном миксере используется система нагрева «светящийся свод», конструкция которой показана на рисунке 2.4.

Материал светящегося блока: корундокарбидокремневый бетон ККБ-70. Используются карбидокремниевые нагревательные элементы в количестве 9 штук. Соединение нагревательных элементов: звезда, в каждой фазе по 3 нагревателя, соединенных последовательно.

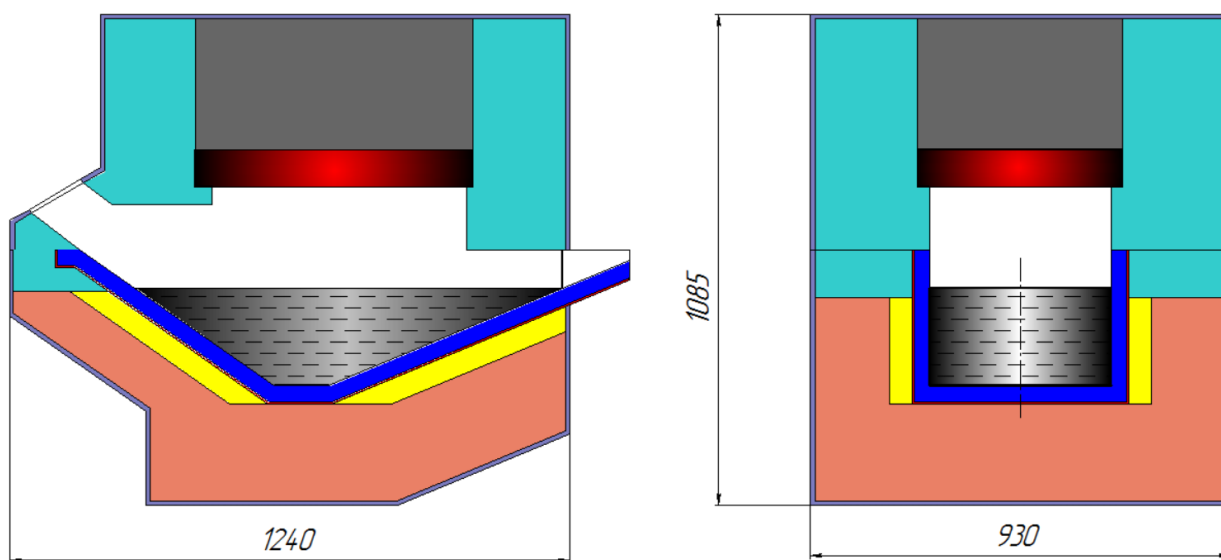


Рисунок 3.1 – Эскиз миксера емкость 100 кг

Расчет выполнялся по методике, описанной в главе 3.2, итерационным методом при параметрах, принятых в таблице 3.1. Рисунок 3.2 поясняет методику определения тепловых потерь через многослойную стенку при условиях третьего рода.

Таблица 3.1 – Начальные данные для определения тепловых потерь

Температура расплава, °С	750
Температура поверхности нагревателя, °С	900
Температура печного пространства, °С	720
Температура окружающего воздуха, °С	20
Коэффициент теплоотдачи к внутренней поверхности, находящейся в расплаве, Вт/м ² К	500
Коэффициент теплоотдачи к внутренней поверхности, находящейся выше уровня расплава, Вт/м ² К	50
Коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности к окружающему воздуху, Вт/м ² К	10

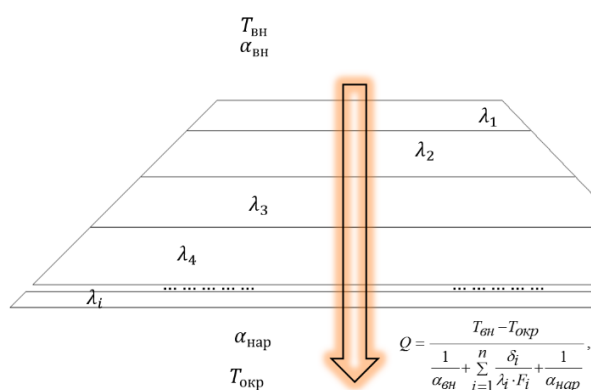


Рисунок 3.2 – Схема определения тепловых потерь при условиях третьего рода

В результате расчета суммарные тепловые через футеровку составили около 2.9 кВт. Но так как расчет выполнялся без учета потерь через заднюю дверцу для заливки расплава, и потерь через открытое леточное отверстие,

тепловые потери будут несколько выше. Результаты расчета приведены ниже в таблице 3.2

Таблица 3.2 – Результаты расчета тепловых потерь

Подина	
Потери, Вт	423.98
Температура внешней поверхности, °С	57.2
Боковая стенка, находящаяся в контакте с расплавом	
Потери, Вт	279.5
Температура внешней поверхности, °С	67.7
Свод	
Потери, Вт	353.9
Температура внешней поверхности, °С	51.1
Боковая стенка, находящаяся выше уровня расплава	
Потери, Вт	749.46
Температура внешней поверхности, °С	137.6
Суммарные тепловые потери $\sum P_{\text{тепл}}$, Вт	
2836	

Полученное значение температуры на поверхности верхней стенки, которое превышает допустимую температуру, может быть неверным, так как инженерная методика позволяет получить только достаточное осреднённое значение температуры по поверхности. Более того, футеровка в этом месте имеет чуть более сложную форму, чем была принята для расчета, и имеет меньшую толщину. Действительное же значение температуры в местах выводов электрических нагревателей может даже превышать температуру, полученную в инженерном расчете, но превышение температуры будет иметь локальный характер.

Для определения мощности миксера нужно рассчитать мощность, необходимую для нагрева заливаемого металла до нужной температуры, Вт

$$P_1 = \frac{G \cdot C_p \cdot (T_1 - T_2)}{\tau} = \frac{100 \cdot 1.09 \cdot 10^2 \cdot (750 - 700)}{900} = 6055,$$

где G – масса заливаемого металла, кг; C_p – удельная теплоемкость расплавленного алюминия, Дж/(кг·°С); T_1 – температура заливаемого металла, °С; T_2 – конечная температура металла, °С; τ – время электронагрева, с;

Номинальная мощность миксера, Вт

$$P_n = \sum P_{\text{тепл}} + P_1 = 3000 + 6055 = 9055.$$

Здесь суммарные тепловые потери через футеровку были приняты несколько завышенными, так как при их расчете не учитывались потери через заднюю дверцу и открытое леточное отверстие.

3.4 Электрический расчет нагревателей миксера емкостью 100 кг

Эскиз нагревателя изображен на рисунке 3.4. Параметры КЭН представлены в таблице 3.3. Номинальное сопротивление активной части соответствует значению сопротивления при температуре 1071 °С [36]. Поверхностная удельная мощность определяется из графика на рисунке 3.4

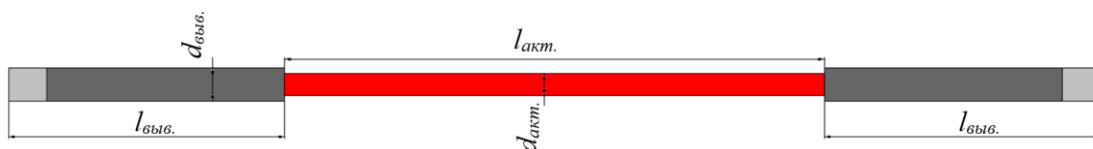


Рисунок 3.3 – Карбидокремниевый нагреватель

Таблица 3.3 – Параметры КЭН для миксера емкостью 100 кг.

Физические параметры			
Поверхностная мощность W , Вт/см ²	Номинальное сопротивление активной части $R_{ном}$, Ом/мм	Сопротивление выводов, $R_{выв}$, Ом/мм	Рабочая температура нагревателя, $T_{раб}$, °С
7	0.00340	0.00008	1100
Геометрические параметры			
Длина активной части, см	Длина выводов, см	Диаметр активной части, см	Диаметр выводов, см
45	23	1.8	2.8

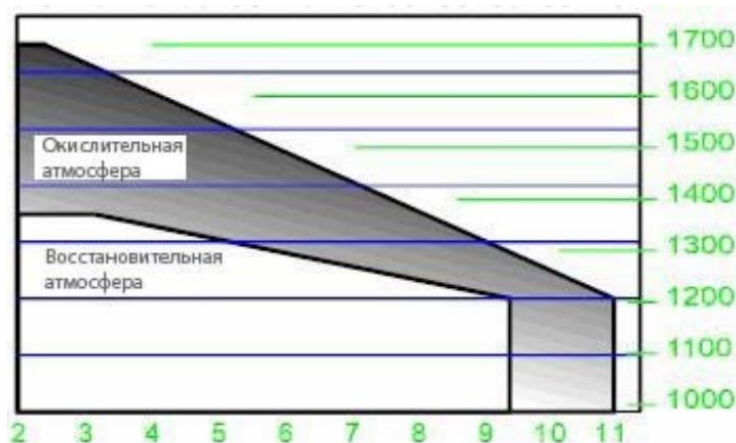


Рисунок 3.4 – Рекомендуемая нагрузка КЭН

Площадь поверхности активной части нагревателя, см²

$$F = \pi \cdot d_{акт.ч} \cdot l_{акт.ч} = 254.47.$$

Мощность нагревателя, Вт

$$P_{нагр} = W \cdot F_{нагр} = 1781.$$

При данной рабочей температуре значение электрического сопротивления КЭН превышает номинальное значение (1071°C) на 10%.

Сопротивление активной части нагревателя, Ом

$$R_{ном.а} = R_{ном} \cdot l_{акт} = 1.53.$$

Сопротивление активной части нагревателя при рабочей температуре, Ом

$$R_{раб} = R_{ном} \cdot 1.1 = 1.68.$$

Нагреватели соединены по трехфазной схеме в звезду, в каждой фазе включены по три нагревателя последовательно.

Общая мощность всех нагревателей, Вт

$$P_{общ} = P_{нагр} \cdot 9 = 16030.$$

Мощность, приходящаяся на фазу, Вт

$$P_{\phi} = \frac{P_{общ}}{3} = 5340.$$

Фазное напряжение, В

$$U_{\phi} = \sqrt{P_{\phi} \cdot 3 \cdot R_{раб}} = 164.$$

Ток фазный, А

$$I_{\phi} = \frac{P_{\phi}}{U_{\phi}} = \frac{U_{\phi}}{3 \cdot R_{\text{раб}}} = 32.5.$$

В связи со старением КЭН во время эксплуатации, их электрическое сопротивление значительно увеличивается, поэтому необходимо иметь возможность повышать фазное напряжение источника питания до 330 В.

3.5 Выводы по главе

1. С помощью описанной инженерной методики определены суммарные тепловые потери через футеровку миксера сопротивления, которые составили 2836 Вт, также были рассчитаны значения температур на внешних поверхностях стенок миксера. Так как инженерная методика расчета тепловых потерь позволяет рассчитать только осредненные значения температур по поверхности и не дает полного представления о распределении температурного поля в элементах конструкции миксера, то ее можно использовать только для предварительной оценки тепловых потерь и проверки правильности выбора футеровочных материалов.
2. Для системы нагрева «светящийся свод» проведен расчет карбидкремниевых электрических нагревателей, в результате которого определена мощность одного нагревателя, которая составила 1780 Вт, мощность всей системы электрического нагрева равна 16 кВт. Нагреватели соединяются по трехфазной схеме в звезду, в каждую фазу включаются последовательно 3 нагревателя. При данном соединении ток в нагревателе составил 32.5 А.

4 Математическое моделирование тепловых процессов в миксере

4.1 Программный продукт ANSYS для моделирования физических процессов

В настоящее время для исследования технических устройств широко применяется математическое моделирование, с помощью так называемых CAE программ, которые позволяют уменьшить затраты и сроки на проектирование. Одной из таких программ является Ansys, позволяющая решать задачи структурного анализа, теплообмена, электромагнетизма и гидродинамики, как по отдельности, так и совместно.

Для разных типов анализа применяются различные методы численного решения уравнений. Например, для электромагнитного анализа применяется программа Ansys Emag, где для решения уравнений электромагнитного поля относительно векторного потенциала применяется метод конечных элементов (МКЭ). Для задач гидродинамики и теплообмена может применяться продукт Ansys CFX, основанный на методе контрольных объёмов (МКО) [37].

Ansys имеет достаточно понятный пользовательский интерфейс, включает в себя инструмент для построения геометрии модели, а также включает возможность импорта геометрии из сторонних CAD программ, например AutoCAD или SolidWorks.

Инструмент обработки результатов Ansys имеет довольно широкие возможности и позволяет просматривать распределение различных величин в исследуемой модели (температура, напряженность магнитного поля и т.д.), направление векторов (скорость, магнитный поток, плотность тока и т.д.), возможность анимации результатов и построения графиков зависимости различных параметров.

В данной работе для математического моделирования нестационарных тепловых процессов в печи используется программа CFX.

4.2 Постановка задачи

Расчетная модель, показана на рисунке 4.1. Футеровка состоит из огнеупорного слоя 1, который контактирует с расплавом 3 и теплоизоляционного слоя 2, в своде установлен теплопроводный блок 4 внутри которого располагаются нагреватели 5. Отверстие для заливки расплава закрыто пробкой 6.

При построении математической модели принимаем, что камера миксера является закрытой, и, следовательно, пренебрегаем конвективным теплообменом в воздушном пространстве печи. Так как металл нагревается сверху также пренебрегаем конвективным движением частиц расплава в процессе нагрева и считаем, что теплопередача осуществляется только теплопроводностью с верхних слоев к нижним. Данные допущения позволяют значительно упростить построение математической модели, и не вносят существенную погрешность в расчеты.

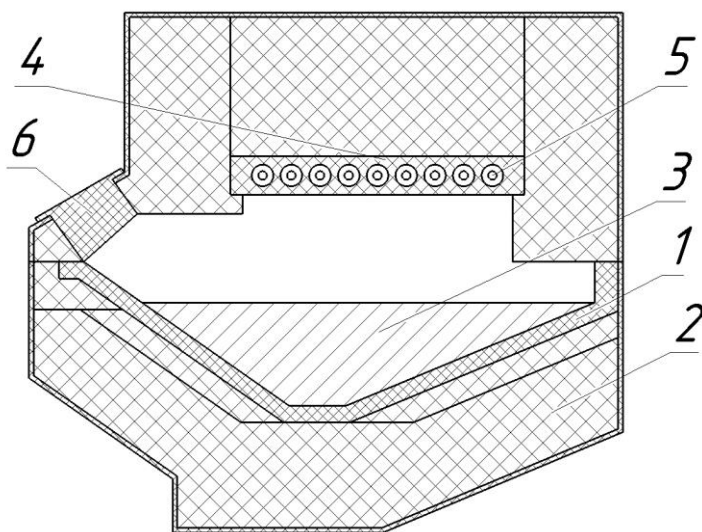


Рисунок 4.1 – Расчетная модель миксера сопротивления

Для того чтобы не допустить перегрева нагревательных элементов и расплава на математическую модель наложены следующие ограничения:

1. Температура верхней поверхности нагревательного блока не должна превышать 950 °С;
2. Температура расплава не должна превышать 750 °С.

Рассмотрим основные уравнения, описывающие процессы теплообмена в данной модели.

Теплопередача от нагревательного блока к расплаву передается излучением и описывается уравнением переноса излучения (4.1)

$$s \frac{\partial I_v}{\partial r} = -(K_a + K_s) I_v, \quad (4.1)$$

$$I_v = I_0 e^{-(K_a + K_s)S},$$

где s – единичный вектор направления излучения; I_v – интенсивность излучения, Вт/(м²·стерад); r – координата; K_a – коэффициент поглощения; K_s – коэффициент рассеяния; I_0 – интенсивность излучения на границе, Вт/(м²·стерад); S – расстояние от точки на границе до точки в объеме газа, м.

Теплопередача в области расплава и футеровки печи осуществляется теплопроводностью и описывается нестационарным уравнением теплопроводности (4.2)

$$\rho(T)c(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (4.2)$$

где ρ – плотность кг/м³; $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ – теплопроводность в направлении осей x, y, z Вт/(м·К); c – теплоемкость Дж/(кг·К); T – температура К; τ – время, с.

Для получения однозначного решения задаются начальные и граничные условия для задачи.

В качестве начального условия задается температура в печи в начальный момент времени.

$$T = T(0).$$

В качестве граничных условий задаются удельная объемная мощность в каждом нагревательном элементе (4.3) и условие теплообмена между внешними стенками печи и окружающей средой по закону Ньютона-Рихмана (4.4).

$$W = f(I), \tag{4.3}$$

$$q = \alpha(T_{нов} - T_{о.с}), \tag{4.4}$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); $T_{нов}$ – температура внешней поверхности, °С; $T_{о.с}$ – температура окружающей среды, °С.

Также по справочным данным задаются коэффициенты черноты поверхностей, плотность, теплоемкость и коэффициенты теплопроводности для каждого материала в зависимости от температуры.

Данные начальных и граничных условий приведены в таблице 4.1. Мощность нагревательной системы принималась исходя из электрического расчета в главе 3 и составляет 16 кВт, мощность одного нагревателя 1781 Вт.

Таблица 4.1 – Данные граничных и начальных условий

Начальная температура в печи, °С	20
Температура окружающего воздуха, °С	20
Удельная объемная мощность в нагревателе, кВт/м ³	15550
Коэффициент теплоотдачи от внешних стенок, кВт/(м ² ·К)	10

4.3 Результаты математического моделирования

Расчет проводился в две стадии: первая стадия – нагрев футеровки печи без расплава до установившегося режима; вторая стадия – заливка расплава при 700 °С и его разогрев.

В результате математического моделирования было получено распределение температурного поля в элементах конструкции миксера и построены кривые нагрева в различных точках печи. Рассмотрим распределение температуры в миксере для установившегося режима работы.

На рисунке 4.1 приведены картины распределения температур на внешних поверхностях миксера. В области летки имеется максимальное превышение температуры (200-370°С). На боковых стенках в области установки нагревательных элементов максимальное значение температуры 195 °С, а в области заливочного кармана температура достигает 150-250 °С. Завышенные значения температур объясняются пониженной толщиной футеровки в этих местах из-за особенности конструкции печи.

Также превышение температуры (120 °С) имеется на боковых стенках в области ниже места установки нагревателей. Следовательно, в данном месте необходимо увеличить толщину футеровки, либо выбрать другой материал, который имеет меньшую теплопроводность.

Для устранения перегрева на боковой стенке было решено изменить конструкцию и материал футеровки в данной области.

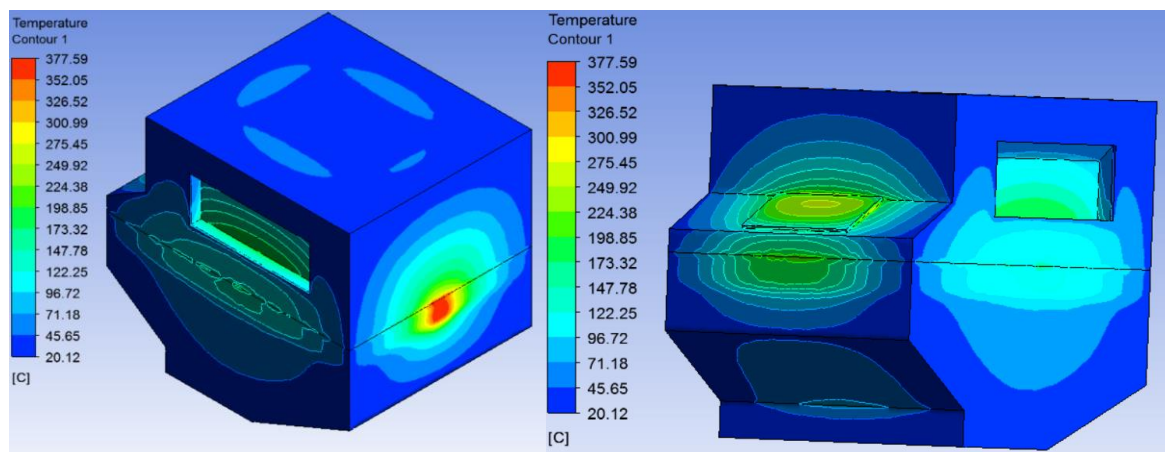


Рисунок 4.2 – Распределение температуры на поверхности печи

На рисунке 4.3, а показано распределение температуры в сечении миксера. Видно, что в установившемся режиме температура нагревательных элементов не превышает 1100 °С, а температура в камере печи не превышает 750 °С, что удовлетворяет условию нагрева. Суммарные тепловые потери в установившемся режиме составляют 2676 Вт, что говорит о том, что мощности нагревательной системы достаточно чтобы компенсировать эти потери и осуществить нагрев металла.

На рисунке 4.3, б представлен график нагрева печи. После 11.5 часов температура в печи достигает установившегося значения. Время, за которое футеровка печи полностью прогревается и достигает установившихся потерь равно примерно 25 часам.

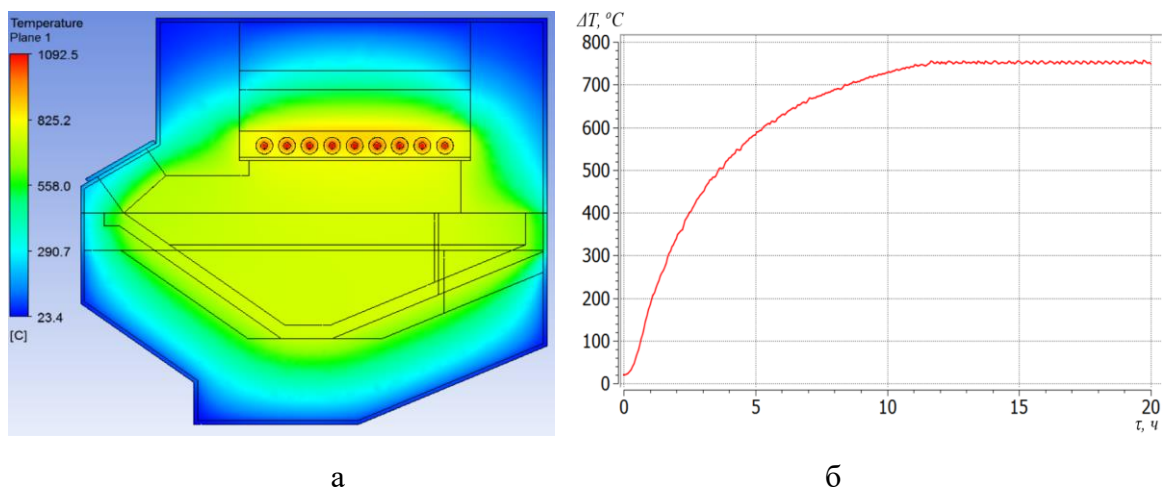


Рисунок 4.3 – Распределение температуры в сечении (а) и кривая нагрева пространства печи (б)

На рисунке 4.4, а показано распределение температуры в нагревательном блоке. Излучающая поверхность имеет температуру 825-850 °С, так как верхняя поверхность блока покрыта теплоизоляционным слоем, температура соответственно на ней выше и составляет 830-950 °С.

Для более полного представления о распределении температуры в нагревательном блоке, а также для оценки равномерности теплового поля построен график разности температур в зависимости от времени нагрева между точками 1 и 2. Из графика на рисунке 4.4 , б видно, что в начале нагрева в момент времени 20-25 минут наблюдается максимальный перепад величиной в 315 °С. В следующие 4.5 часа происходит снижение перепада температур, и в итоге установившаяся разность температур между точками составляет 25 °С.

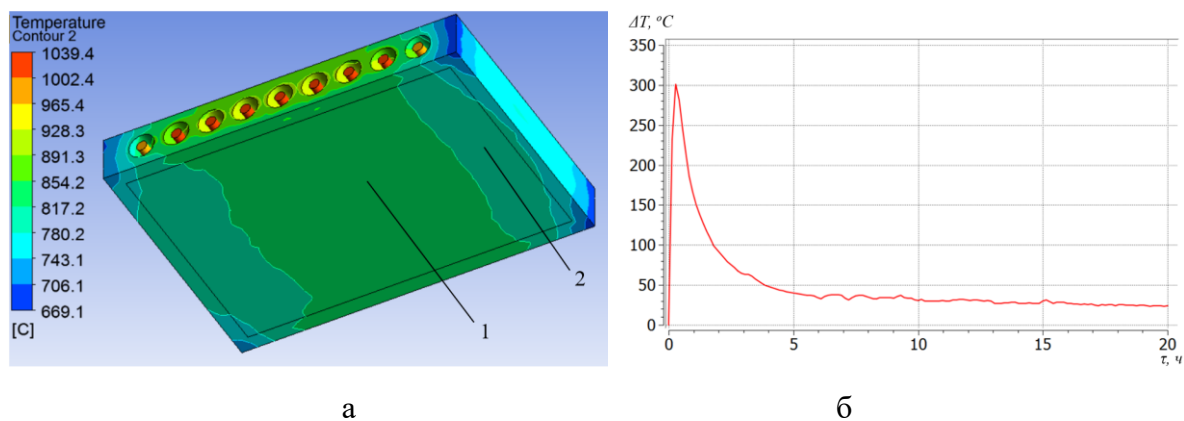


Рисунок 4.4 – Распределение температуры на излучающей поверхности (а) и перепад температур между точками 1 и 2 (б)

Так как термопара располагается в нагревательном своде на некотором расстоянии от нагревательного элемента, и регулирование температуры происходит по измерениям температуры точки в которой она располагается, важно знать температурный перепад между этой точкой и нагревательным элементом.

На рисунке 4.5 представлен график перепада температур между точкой, где располагается термопара и нагревателем. Максимальный температурный перепад в 750 °C возникает в момент включения нагревателей, дальше в течение часа происходит снижение разности температур. Далее в процессе работы в зависимости от цикла включения и отключения нагревателей перепад температур колеблется с максимальным значением в 210 °C.

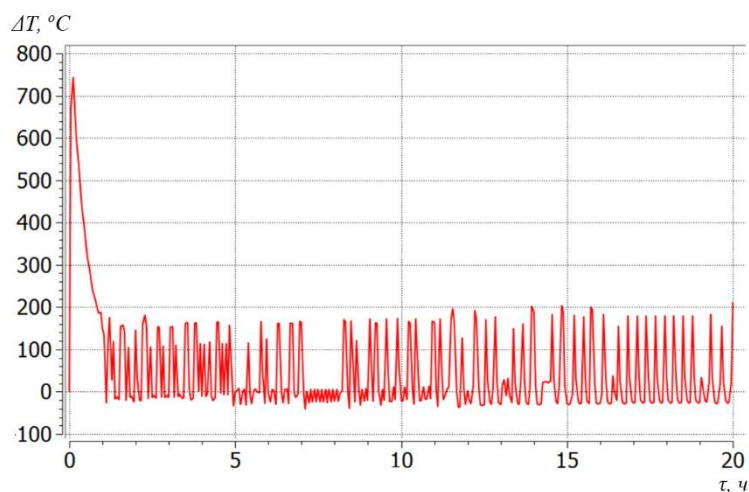


Рисунок 4.5 – Перепад температур между нагревательным элементом и точкой свода, где расположена термопара

На рисунке 4.6 представлен график нагрева расплава, видно, что, нагрев от 700 °C до 720 °C происходит на 25 минут, последующий нагрев металла происходит не эффективно, и за следующие 35 минут металл прогревается только до 725 °C. Это объясняется тем, что в результате уменьшения перепада температур между излучающей поверхностью и зеркалом расплава снижается и тепловой поток.

Для того чтобы сделать, нагрев более интенсивным, можно увеличить температуру излучающей поверхности, но, следовательно, увеличится и температура на нагревательных элементах.

На рисунке 4.7 показано распределение температуры в металле по глубине ванны.

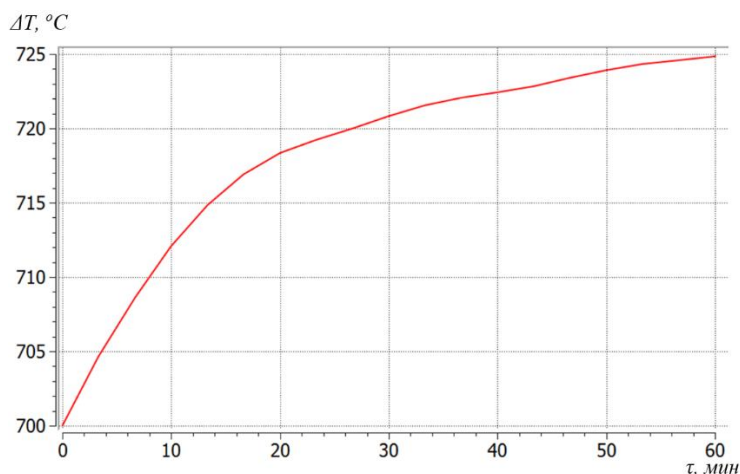


Рисунок 4.6 – Кривая нагрева металла

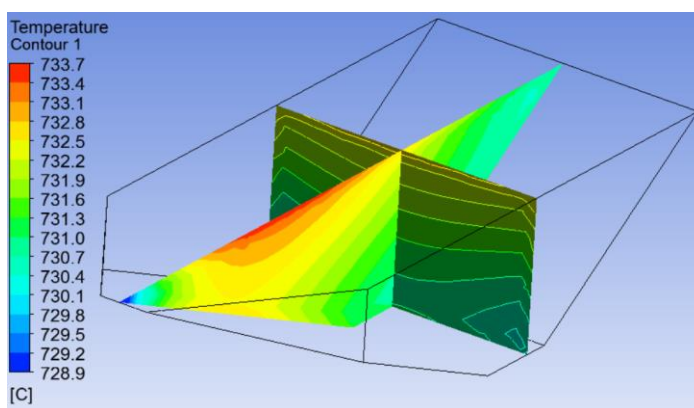


Рисунок 4.7 – Распределение температуры в металле по глубине ванны

4.4 Выводы по главе

1. Построена математическая модель нестационарных тепловых процессов в миксере сопротивления с системой нагрева «светящийся свод». В результате получено распределение температуры в элементах конструкции миксера и определены места локального перегрева на внешних поверхностях миксера. В результате недопустимого температурного превышения на боковых стенках миксера, было решено поменять конструкцию и материал футеровки в этой области

2. Определено время разогрева печи до установившейся температуры в печи, которое составляет 11.5 часов. Потери при установившемся режиме составили 2676 Вт.
3. Получено распределение температуры в нагревательном блоке. Максимальный перепад температур между серединой и краем излучающей поверхности составил 315 °С, в установившемся режиме разность температур составляет 25 °С. Перепад температур между точкой свода, которой расплывается термопара и нагревательным элементом в установившемся режиме колеблется от 0 до 210 °С.
4. Получен график разогрева металла. При температуре излучающей поверхности 850 °С разогрев до 720 °С происходит за 25 минут. Для того чтобы нагрев был более интенсивным необходимо увеличить температуру излучающей поверхности, но вследствие этого увеличится и температура на нагревательных элементах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Из проведенного обзора современных систем электрического нагрева, были выявлены преимущества применения нагревательной системы «светящийся свод», которые заключаются в увеличении площади излучающей поверхности и отделения нагревательных элементов от внутripечной агрессивной среды;
2. По инженерной методике методом последовательных приближений определены тепловые потери через футеровку печи в установившемся режиме, которые составили 2836 Вт;
3. Проведен электрический расчет нагревательных элементов для системы «светящийся свод», в результате которого были определены ток в нагревателе, мощность нагревательной системы и схема соединения нагревательных элементов;
4. Построена математическая модель тепловых процессов в миксере. В результате моделирования было получено поле температур в печи, кривые нагрева печи и металла. Время, за которое температура в печи достигает 750 °С составляет 11.5 часов. Потери в установившемся режиме составляю 2676 Вт.
5. Нагрев металла с 700 °С до 720 °С при температуре излучающей поверхности 850 °С происходит за 25 минут, дальнейший нагрев при этой температуре излучающей поверхности становится не эффективным. Даны рекомендации по повышению интенсивности нагрева.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Электротермическое оборудование : Справочник / А. П. Альтгаузен. – Москва : Энергия, 1980. – 416 с.
2. Свенчанский А. Д. Электрические промышленные печи. Электрические печи сопротивления : учебник для вузов / А. Д. Свенчанский. – Москва : Энергия, 1975. – 384 с.
3. Чередниченко, В. С. Электрические печи сопротивления. Теплопередача и расчеты электропечей сопротивления : монография / В. С. Чередниченко, А. С. Бородачев, В. Д. Артемьев; под ред. В. С. Чередниченко. – Новосибирск : НГТУ, 2006. – 624 с. – («Современные электротехнологии». – Т. 1).
4. Мягков А. С. Перспективы развития Российских предприятий по производству огнеупоров / А. С. Мягков // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. – Кисловодск, 2013.
5. Михайлов К. А. Особенности эксплуатации электронагревателей в электрических миксерах и внепечных установках / Сборник материалов VIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, посвященной 155-летию со дня рождения К. Э. Циолковского. – Красноярск, 2012.
6. Михайлов Д. А, Темеров А. А, Видин Ю. В. Исследование энергетических характеристик электронагревателя горячая подина / Д. А. Михайлов // Вестник ВГТУ. – Воронеж, 2010. – Т. 6, № 9.
7. Темеров А. А, Михайлов Д. А. Исследование качества алюминиевых сплавов, получаемых в миксере с комбинированным нагревом / А. А. Темеров // Вестник ВГТУ. – Воронеж, 2009. – Т. 5, № 11.
8. Темеров А. А, Тимофеев В. Н, Михайлов Д. А. К вопросу применения систем комбинированного нагрева в электрических миксерах для приготовления алюминиевых сплавов / А. А. Темеров // Вестник ВГТУ. – Воронеж, 2010. – Т. 6, С. 155-159.

9. Темеров А. А, Тимофеев В. Н, Михайлов Д. А Повышение надежности и энергетической эффективности систем электронагрева электрических миксеров для приготовления алюминиевых сплавов / А. А Темеров // Вестник СибГАУ им. академика М. Ф. Решетнева. – Красноярск, 2010. – Т. 6, С. 150-154.
10. Темеров А. А, Тимофеев В. Н, Михайлов Д. А Повышение надежности систем электронагрева электрических миксеров и внепечного оборудования / А. А Темеров // Цветные металлы. – Красноярск, 2011, С. 634-639.
11. Михайлов Д. А, Михайлов К. А К вопросу повышения надежности и энергетической эффективности нагревателей электрических миксеров для приготовления сплавов на основе алюминия / XVII Международная научно-практическая конференция «Современные техника и технологии». – Томск, 2012, С. 231-232.
12. Михайлов К. А Разработка энергоэффективной системы нагрева для электрических миксеров и внепечных установок обработки алюминиевых сплавов / Молодежь и наука: сборник материалов IX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2013.
13. Коков А. С, Михайлов К. А Опыт создания и внедрения систем электронагрева отечественного производства на предприятия алюминиевой промышленности / Молодежь и наука: сборник материалов IX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2013.
14. Павлов Е. А. Магнитогидродинамический перемешиватель алюминиевых расплавов в миксере сопротивления : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Павлов Евгений Александрович. – Красноярск, 2006. – 24 с.

15. Тимофеев, В. Н. Электротехнологические установки для плавильно-литейного производства алюминиевых сплавов / Цветные металлы Сибири - 2009 : сб. докл. первого междунар. Конгресса. - Красноярск : 2009. - С. 657-663.
16. Шейден, О. Разработки в области электромагнитного перемешивания (ЭМП) расплава в печах для плавки алюминия / Цветные металлы Сибири - 2009 : сб. докл. первого междунар. Конгресса. - Красноярск : 2009. - С. 648-656.
17. Вольдек А. И Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом / А. И. Вольдек. – Ленинград : Энергия, 1970. – 272 с.
18. Mechatherm International Ltd. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.mechatherm.com/>
19. Remix S.A. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.remixsa.pl/ru>
20. ООО «СИБЭЛЕКТРОТЕРМ» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.sibelectrotherm.ru>.
21. ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.npcmgd.com>.
22. Христинич А. Р. Повышение надежности электрического плавильно-литейного агрегата для алюминия : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Христинич Алексей Романович. – Красноярск, 2010. – 20 с.
23. Христинич А. Р. Повышение надежности электрического плавильно-литейного агрегата / А. Р. Христинич // Вестник ВГТУ. – Воронеж, 2010. – Т. 6, №2
24. Пат. 95664 Российская Федерация, МПК С 21 С 1/06, Н 05 В 3/62, F 27 В 3/10, Н 05 В 3/62. Электропечь-миксер / Р. М. Христинич, А. Р. Христинич, заявл. 02.06.2008; опубл. 10.07.2010.

25. Пат. 2371652 Российская Федерация, МПК F 27 В 3/10, Н 05 В 3/62, F 27 D 11/04. Электрическая печь для приготовления цветных металлов / Д. А. Михайлов, В. Н. Тимофеев, А. А. Темеров - №20008105016/02, заявл. 11.02.2008; опубл. 27.10.2009, Бюл. № 30. – 7 с.
26. Михайлов Д. А. Электрический миксер с комбинированным нагревом для приготовления алюминиевых сплавов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Михайлов Дмитрий Александрович. – Красноярск, 2011. – 20 с.
27. Пат. 32953 Российская Федерация, МПК Н 05 В 3/46, Н 05 В 3/68, Н 05 В 3/64. Электронагреватель / А. А. Темеров, В. Н. Тимофеев, П. А. Хоменков; опубл. 27.09.2003.
28. Электрооборудование и автоматика электротермических установок : справочник / А. П. Альтгаузен, М. Д. Бершицкий, М. Я. Смелянский, В. М. Эдемский. – Москва : Энергия, 1978. – 303 с.
29. Электротехнологические промышленные установки : учебник для вузов / А. Д. Свенчанский, И. П. Евтюкова, Л. С. Кацевич, Н. М. Некрасова. – Москва : Энергоиздат, 1982. – 400 с.
30. Болотов А. В. Электротехнологические установки : учебник для вузов / А. В. Болотов, Г. А. Шепель. – Москва : Высшая школа, 1988. – 336 с.
31. Яров В. М. Источники питания электрических печей сопротивления : учебное пособие / В. М. Яров. – Чебоксары : Чувашский гос. ун-т, 1982. – 123 с.
32. Фомичев Е. П. Электротехнологические промышленные установки : учебное пособие / Е. П. Фомичев. – Киев : Вища школа, 1979. – 264 с.
33. Электropечи сопротивления с широтно-импульсным управлением с применением тиристоров / М. И. Колкер, Я. А. Полищук, С. Г. Обухов, В. М. Яров. – Москва : Энергия, 1977. – 104 с.

34. Автоматическое управление электротехнологическими установками : учебник для вузов / А. М Кручинин [и др.] ; под ред. А. Д Свенчанского. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.
35. Автоматизация металлургических печей : учебник для вузов / В. Ю. Каганов, О. М. Блинов, Г. М. Глинков, В. А. Морозов. – Москва : Металлургия, 1975. – 376 с.
36. I Squared R. Element Co., Inc. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.isquaredrelement.com/>
37. Ansys Help 17.0 [Электронный ресурс]. Академическая лицензия ANSYS 17.0. ФГОУ СФУ