

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
институт
Кафедра «ЭТ и ЭТ»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В.Н. Тимофеев
« _____ » _____ 2017 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

140400.62 «Электротехнология и электротехника»

13.03.02.11 «Электротехнологические установки и системы»

Плавильно-литейный комплекс для литья алюминиевых сплавов

Руководитель	_____	<u>ст. преподаватель, к.т.н.</u>	<u>А.А. Авдулов</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускники	_____	<u>ФЭ13-07Б, 071313960</u>	<u>В.Ю. Лахин</u>
	подпись, дата	номер группы, зачетной книжки	инициалы, фамилия
	_____	<u>ФЭ13-07Б, 071314013</u>	<u>М.Д. Завражин</u>
	подпись, дата	номер группы, зачетной книжки	инициалы, фамилия
Нормоконтроллер	_____	<u>профессор, д.т.н</u>	<u>М.В.Первухин</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия

Красноярск 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1 Плавильно-литейный комплекс для литья алюминиевых сплавов.....	7
1.1 Принцип работы литейной машины с электромагнитным кристаллизатором.....	7
1.2 Принцип работы и конструкция электромагнитного кристаллизатора (ЭМК).....	9
1.3 Практическое использование плавильно-литейного комплекса.....	11
2 Раздаточная печь с дозирующим устройством.....	22
2.1 Системы дозирования металла.....	24
2.1.1 Система дозирования расплава «поплавкового» типа.....	24
2.1.2 Дозирование поворотом индукционной тигельной печью.....	25
2.1.3 Дозирование индукционным насосом.....	26
2.1.4 Система дозирования расплава с помощью погружного МГД насоса.....	27
2.2 Теплоизоляционные материалы, применяемые в раздаточной печи.....	28
2.3 Электронагревательные коврики (КЭН)	32
2.4 Тепловой расчёт электрической раздаточной печи с дозирующим устройством, емкостью 130 кг.....	33
3 Экспериментальные измерения величин раздаточной печи с дозирующим устройством.....	43
Заключение.....	49
Список использованных источников.....	51
Приложение А Сборочный чертёж раздаточной печи.....	52
Приложение Б Чертёж подвижного поршня.....	53
Приложение В Чертёж дозирующего лотка.....	54
Приложение Г Чертёж КЭН №5 и №6 дозирующего лотка.....	55

ВВЕДЕНИЕ

Алюминиевые сплавы находят широкое применение во многих отраслях промышленности. Этому способствовало удачное сочетание физических свойств алюминиевых сплавов, которые зависят от ряда факторов. В частности, добавление к алюминию легирующих элементов (медь, кремний, магний, цинк, марганец и др.) или уже присутствие их в жидкой ванне оказывает существенное влияние на характеристики сплавов.

В алюминиевых сплавах могут присутствовать почти все металлы периодической системы элементов, одни в качестве легирующих элементов, другие в качестве нежелательных примесей. Поэтому плавильно-литейное производство алюминиевых сплавов должно предусматривать такие операции как плавление твердого алюминия или алюминиевого лома, добавление легирующих элементов и перемешивание расплава с целью выравнивания химического состава и его температуры во всем объеме ванны, очистка расплава от неметаллических включений (фильтрация), очистка от ненужных примесей (рафинирование), удаление газов из расплава (дегазация), получение из расплава слитков в твердом состоянии (кристаллизация), транспортировка расплава от одного технологического оборудования к другому.

На всех этапах плавильно-литейного производства возможно использование магнито-гидродинамических (МГД) технологий, основанных на взаимодействии жидких металлов с электромагнитным полем.

Поскольку совершенствование авиационной и ракетно-космической техники заставляет решать задачу снижения массы летательных аппаратов, а бортовая кабельная сеть (БКС) является «нервной системой» летательных аппаратов и занимает существенную долю их массы (20-25%), то мировой тенденцией снижения массы проводников является использование в качестве основного материала алюминиевых сплавов взамен меди. Однако достигнутые в настоящий момент свойства проволоки из специальных алюминиевых сплавов не обеспечивают одновременно высокой электропроводности и

жаропрочности, что критически важно для БКС авиакосмической техники. В связи с этим рабочие температуры алюминиевых проводов БКС не превышают 100-180°C при требуемых 250°C. При этом существующие промышленные технологии не позволяют с высоким выходом годной продукции изготавливать проволоку из специальных сплавов диаметром менее 0.5 мм, что также ограничивает внедрение алюминиевых проводов в авиакосмической техники. Дефицит такой кабельной продукции восполняется отечественными потребителями за счет закупок исключительно импортных проводов и кабелей, что никогда не приветствовалось Государственным заказчиком.

Зарубежные производители авиатехники в последние годы активно занимаются разработкой и внедрением алюминиевых проводов. Так, например, «двухэтажный» AIRBUS A380 является первым самолетом компании, где применены алюминиевые кабели и провода с сечением меньше 5 мм², что позволило дополнительно снизить вес БКС на 500 кг. Для сравнения: это больше половины экономии веса, полученного за счет изготовления из углеволокна центроплана (CentralTorsionBox), на разработку которого были потрачены миллионы евро. В дальнейшем AIRBUS планирует использовать данное решение на A400M и A350XWB. Всего в A380 в 300 из 500 километров проводов и кабелей используются алюминий вместо обычной меди в качестве электрического проводника, что позволило снизить вес БКС на 20%. При этом в качестве проводниковой жилы приходится использовать аналог отечественного сплава АМГ1, имеющего допустимую рабочую температуру только до 180 °С и существенно большее сопротивление по сравнению с чистым алюминием [1].

Начиная с 2005г, в ходе реализации программы по импортозамещению, АО «Особое конструкторское бюро кабельной промышленности» (ОКБ КП - головное предприятие в РФ, занимающееся разработкой и производством бортовых проводов) проводит ОКР по созданию серии облегченных кабельных изделий для авиационной техники с использованием новых отечественных изоляционных и проводниковых материалов. В настоящее время в АО «ОКБ

КП» разработаны бортовые провода с токопроводящими жилами из алюминиевого сплава и комбинированной изоляции марок:

- БК-36-448 и БКЭ-36-448 по ТУ 16.К76-236-2009 сечением от 4 до 95 мм² с никелевым покрытием, рабочей температурой 200°С;

- БФС-А и БФСЭ-А теплостойкие по ТУ 16-705.405-85 сечением от 4 мм² до 95 мм² без покрытия, рабочей температурой 250°С.

Более высокая максимальная рабочая температура отечественных проводов по сравнению с зарубежными достигается за счет использования жилы из сплава алюминия с редкоземельными металлами 01417. При освоении производства проволоки из сплава 01417 существующими технологиями было обнаружено, что из-за крупнозернистой и неоднородной микроструктуры производство проволоки малых диаметров экономически нецелесообразно (высокая обрывность при волочении) [1].

Для решения данной проблемы специалистами ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» совместно с сотрудниками СФУ и ООО «АвиаСпецСплав» была разработана уникальная технология литья в электромагнитный кристаллизатор, которая позволяет получить проволоку из жаропрочных алюминиевых сплавов со структурой сопоставимой со структурой гранул (порошковая металлургия). При этом технология обеспечивает существенно более высокую производительность, низкую себестоимость, требуемые технические характеристики и высокое качество выпускаемой продукции.

В ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» создан опытно-промышленный литейный комплекс с электромагнитным кристаллизатором производительностью до 20 тонн в год непрерывно-литой заготовки диаметром 8 мм. На опытно-промышленной установке получены слитки из сплава 01417м, обладающие высокими механическими и электрическими свойствами, сохраняющимися до температуры 250°С. В партнёрстве с ОКБ Кабельной промышленности, и НПЦ АвиаСпецСплав из полученных слитков изготовлены

провода для БКС самолетов-амфибий Бе-200, что позволило снизить вес машины на 1 тонну.

В настоящее время стоит задача повышения качества выпускаемой продукции путем стабилизации диаметра слитка, что позволит повысить технологичность переработки изделий в проволоку и начать массовое внедрение алюминиевых проводов в авиакосмической техники. Для этого необходимо разработать раздаточную печь с системой дозирования, обеспечивающую стабильное поддержание уровня и температуры расплава.

1 Плавильно-литейный комплекс для литья алюминиевых сплавов

Применение интенсивного электромагнитного перемешивания на стадии литья слитка позволяет повысить скорость кристаллизации за счет турбулентной теплопроводности и выровнять условия теплообмена в области фазового перехода. Это обеспечивает повышение качества слитка, выражающееся в равномерной и мелкодисперсной кристаллической структуре в его поперечном сечении. Для обеспечения этих эффектов при литье цилиндрических слитков малого диаметра необходимо создание в области кристаллизации интенсивных течений металла. Цветные металлы и сплавы на их основе имеют низкую температуру разливки и высокую теплопроводность по сравнению с черными металлами, что предопределяет относительно небольшую глубину лунки жидкой фазы непрерывно литой заготовки [2].

Суть технологии заключается в кристаллизации алюминиевого расплава в высокочастотном электромагнитном поле с непосредственной подачей охлаждающей воды на слиток. За счет этого происходит бесконтактное формирование слитка диаметром 8-12мм со скоростью охлаждения свыше 1000К/с и интенсивным магнитогидродинамическим воздействием на границе раздела фаз, что обеспечивает получение проволоки с уникальной структурой [2].

1.1 Принцип работы литейной машины с электромагнитным кристаллизатором

В плавильной печи (1) осуществляется приготовление алюминиевого сплава, однородность по химическому составу и температуре обеспечивается путем использования электромагнитного перемешивателя (2). Расплав из плавильной печи (1) поступает в дозирующий лоток (3) (приложение В), где поддерживается заданная температура и уровень расплава. Через подающий носик лотка расплав поступает в индуктор электромагнитного кристаллизатора (4), в котором геометрия слитка бесконтактно формируется высокочастотным

электромагнитным полем. Охлаждающая жидкость из охладителя (5) непосредственно подается на заготовку, что обеспечивает высокую скорость охлаждения и позволяет получить непрерывнолитую заготовку (6). Заготовка далее с помощью отводного механизма выводится из кристаллизатора и наматывается в бухту (рисунок 1.1) [3].

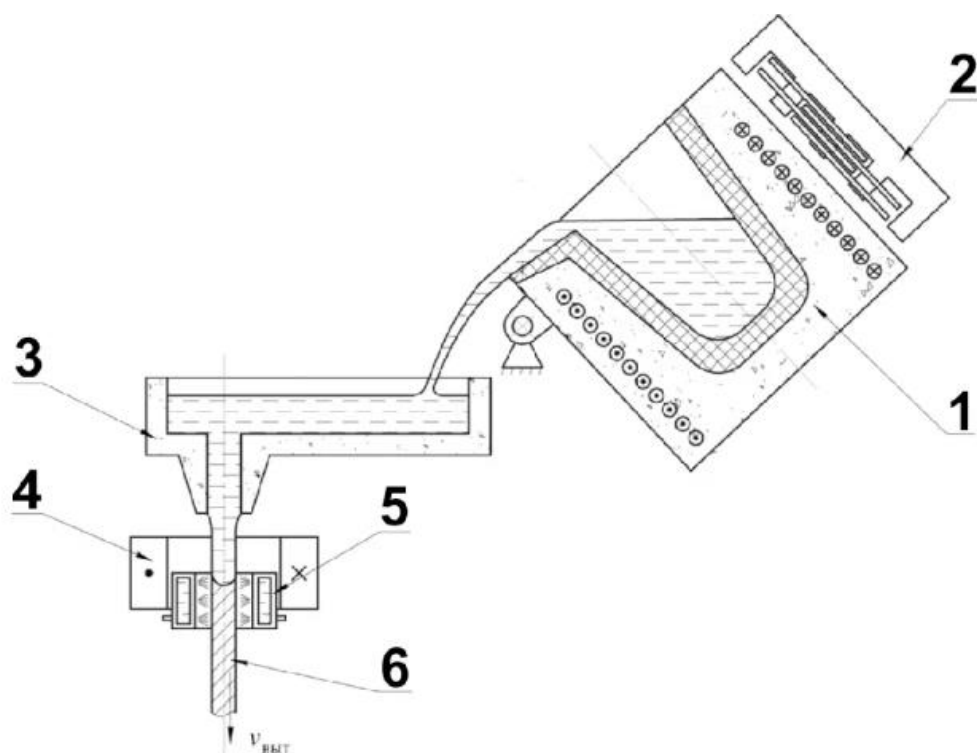


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема комплекса

Одной из основных особенностей литья в электромагнитный кристаллизатор является отсутствие формообразователя (фильеры). Удержания жидкого металла происходит за счет компенсации силы тяжести действием электромагнитных сил, т.е. в жидкой фазе слитка у фронта кристаллизации уравниваются гидростатическое и электромагнитное давление. В связи с этим высота жидкой фазы слитка должна быть постоянна на протяжении всего процесса литья. Это достигается за счет автоматизированной системы контроля уровня металла [3].

Для получения алюминиевых слитков требуемого качества необходимо создать определенные условия, которые можно представить в качестве технологических параметров процесса литья. К основным параметрам относятся: скорость вытягивания слитка, температура литья, напряжение на индукторе и ток в индукторе (подводимая мощность), частота питающего индуктор напряжения, диаметр слитка, расход охлаждающей воды (интенсивность охлаждения), высота жидкой фазы.

1.2 Принцип работы и конструкция электромагнитного кристаллизатора (ЭМК)

Основным узлом литейной машины является электромагнитный кристаллизатор. Эскиз кристаллизатора представлен на рисунке 1.2. Данный узел является наиболее важным, так как он отвечает за диаметр слитка и стабильность процесса.

Для создания равномерного магнитного поля по периметру жидкой зоны и уменьшения питающего напряжения в ЭМК применяются в основном одновитковые индукторы и экраны, изготовленные из медной прямоугольной трубки или медной шины.

Основными параметрами ЭМК, определяющими характеристики процесса литья и структуру получаемых слитков, являются: воздушный зазор между индуктором, экраном и слитком; отношение высоты индуктора к его диаметру и расположение пояса охлаждения относительно индуктора.

Электромагнитный кристаллизатор состоит из: возбуждающего переменное электромагнитное поле индуктора (1), электромагнитного экрана (2), служащего для коррекции распределения магнитного поля на поверхности жидкой зоны и регулирования интенсивности циркуляции, кольцевого охладителя (3), обеспечивающего равномерную подачу охлаждающей жидкости, токопроводящее основание (5), регулирующие опоры (7) [4].

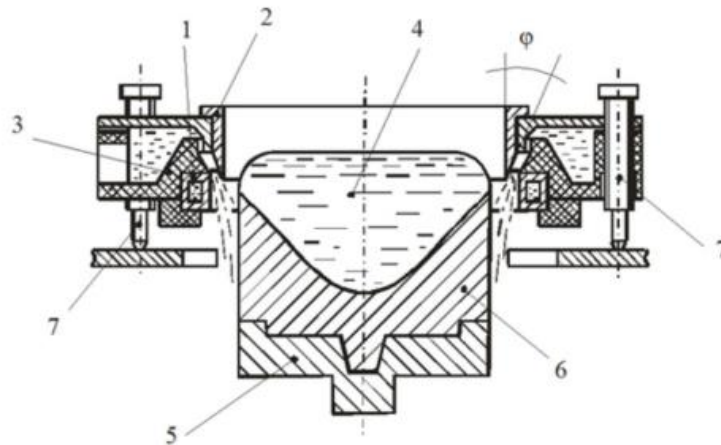


Рисунок 1.2 – Эскиз электромагнитного кристаллизатора

Принцип действия ЭМК состоит в следующем: жидкий металл, подаваемый из миксера через литейную оснастку в ЭМК, попадает в пульсирующее электромагнитное поле, создаваемое индуктором (1). Под действием электромагнитных сил жидкий металл, находящийся под некоторым гидростатическим давлением, сжимается в радиальном направлении и приобретает в поперечном сечении форму индуктора [4].

Процесс литья в ЭМК сводится к формированию жидкой фазы (4), имеющей в поперечном сечении форму слитка. Жидкометаллическая масса удерживается от растекания электромагнитным полем, интенсивность которого регулируется экраном (2). Электромагнитный экран устанавливается на регулирующих опорах (7) таким образом, что его можно перемещать в вертикальном направлении с целью выбора условий процесса литья. Формируемый магнитным полем столб жидкого металла опирается на токопроводящее основание (5), представляющее собой металлическую затравку, переходящую в процессе литья в кристаллизирующийся слиток [4].

Для обеспечения устойчивого процесса литья и получения слитка заданной геометрии необходимо, чтобы распределение электромагнитных сил по высоте жидкой зоны приближалось к линейному закону распределения гидростатического давления.

Для охлаждения слитка используют один или несколько поясов охлаждения, расположенных на разных вертикальных уровнях. Верхний пояс обеспечивает начальное образование корочки и полное затвердевание слитка. Нижний пояс усиливает охлаждение слитка. Количество охлаждающей жидкости зависит от сплава, размеров и скорости вытягивания слитка. Под действием охлаждающей воды, поступающей на боковую поверхность слитка, жидкометаллическая масса непрерывно затвердевает, превращаясь в слиток (б), и отводится вниз. Подача охлаждающей жидкости на поверхность слитка может осуществляться под острым углом или под углом, близким к прямому.

Граница раздела твердой и жидкой областей образует фронт кристаллизации. Фронт кристаллизации на периферии слитка находится на некотором расстоянии от пояса охлаждения. Для уменьшения энергетических затрат и устойчивого процесса литья граница жидкой зоны должна находиться в зоне наибольшей интенсивности магнитного поля, т.е. примерно на уровне средней линии индуктора. Рассмотренная конструкция ЭМК разработана для промышленного получения слитков больших диаметров (100–500 мм) [4].

1.3 Практическое использование плавно-литейного комплекса

Скорость литья влияет на качество слитка, а также на производительность процесса, определяемого как количество массы металла, отлитого в единицу времени. При этом скорость литья должна быть меньше, чем критическая, при которой нарушается формирование слитка и возникает структурная неоднородность по сечению слитка и дефекты на его поверхности. Величина критической скорости литья слитков зависит от химического состава отливаемого сплава, формы и размера поперечного сечения слитка. Чем больше расплав содержит легирующих элементов, тем в большей мере приходится ограничивать скорость литья. При выборе скорости литья на первый план выступают качественные характеристики: высота, плотность, равномерность структуры и механические свойства по сечению слитка.

Температура литья влияет на форму, величину зерна и внутреннее строение слитка. Так как диаметр слитка, и соответственно, расход металла и размеры литейной оснастки малы, то во избежание замерзания расплава, особенно в начальной стадии литья, необходим перегрев металла. Напряжение на индукторе при заданных высоте столба жидкой фазы и размерах индуктора определяется диаметром слитка и частотой тока. Напряжение контролируется и поддерживается постоянным или регулируется системой автоматического регулирования размеров слитка. Высота жидкой зоны существенно влияет на процесс кристаллизации. Колебания высоты жидкой зоны приводят к изменению размеров слитка.

Расход охлаждающей жидкости существенно влияет на устойчивость процесса литья и структуру слитка. Расположение пояса охлаждения и расход охлаждающей воды должны быть такими, чтобы фронт кристаллизации находился на уровне середины высоты индуктора, где электромагнитные силы максимальны. Электромагнитное литье является достаточно нестабильным процессом, требующего высокой культуры производства, точности изготовления литейной оснастки и стабильности параметров литья. Экспериментально было установлено, что наиболее оптимальным режимом работы установки, обеспечивающим стабильность процесса и физико-механических свойств, является литье слитка диаметром от 6 до 12 мм при скорости литья от 2 до 12 мм/с. Результаты проведения материаловедческих исследований показали, что увеличение скорости литья способствует измельчению дендридного параметра структуры слитка, что благоприятно сказывается на свойствах изделия. При этом рост диаметра слитка свыше 10-12 мм ведет к неоднородности структуры и физико-механических свойств по сечению слитка.

Особенность технологического процесса литья в ЭМК позволяет при перекомпоновке оборудования создать литейный комплекс, состоящий из унифицированных литейных модулей.

Металлоконструкция комплекса представляет собой двухуровневую площадку с двумя рабочими зонами, как показано на рисунке 1.3. На первом уровне располагаются вытяжной и намоточные механизмы, источники питания печи и силовые шкафы. На втором уровне располагаются печь с согласующим контуром, дозирующий лоток, электромагнитный кристаллизатор с ТВЧ генератором и согласующим контуром, лазерный датчик уровня и пульт управления.



Рисунок 1.3 – Общий вид опытно-промышленного комплекса

Для приготовления и выдержки расплава в установке использована индукционная тигельная печь (рисунок 1.4), предназначенная для приготовления расплавов веществ с температурой плавления до 1500 °С. Печь состоит из электропроводящего графитового тигля и индуктора, размещенных в футерованном каркасе. Для наклона печи используется электропривод с частотным преобразователем. Нагрев расплавляемого материала в печи осуществляется косвенно, т. е. индукционным способом нагревается тигель, от которого и происходит нагрев металла до температуры плавления и перегрева.

Крышка печи изготавливается из легковесного пенодиатомитового кирпича и поднимается с помощью рычажного механизма подъёмника, позволяющего поднять крышку на 90 градусов.



Рисунок 1.4 - Индукционная тигельная печь

Для согласования параметров индуктора тигельной печи с параметрами источника питания использован блок, состоящий из понижающего трансформатора и батареи конденсаторов для компенсации реактивной мощности (рисунок 1.5). Печь и согласующий контур соединены между собой высоковольтными проводами.



Рисунок 1.5 - Согласующий контур

Для питания печи применяется генератор плавильной печи, на выходе которого выдается напряжение 300 В и ток до 50 А, представленный на рисунке 1.6, используется разрешенная к промышленному применению частота 66 кГц.



Рисунок 1.6 - Источник питания тигельной печи

Из тигельной печи, расплав заливается в печь с дозирующим устройством (рисунок 1.7), где с помощью системы электронагрева поддерживается заданная температура. Раздаточная печь с дозирующим устройством выполнена в стационарном исполнении с системой электронагрева, расположенной между керамическим тиглем и футеровкой.



Рисунок 1.7 - Раздаточная печь с дозирующим устройством

Заливка расплава происходит следующим образом: лоток прогревается до 700°С; шток литейного отверстия опускается (отверстие закрыто); в индуктор вставляется затравка, которая проходит через проводящие и приводные ролики (рисунок 1.8) ; поршень-регулятор (приложение Б) поднимается; снимается первая секция крышки; заливается расплав из тигельной печи до уровня заливочного отверстия; устанавливается первая секция крышки; поршень-регулятор опускается; уровень металла в лотке поднимается до значения 30мм (относительно заливочного отверстия); шток литейного отверстия поднимается.



Рисунок 1.8 - Протяжные ролики

С помощью механизма поддержания уровня устанавливается необходимый уровень расплава в миксере. В крышке лотка в области литейного носика сделано отверстие размером 15x30 мм для прохождения лазерного луча датчика уровня ProH CD700R300, показанного на рисунке 1.9. Там же расположено смотровое окно из жаропрочного стекла с размером 150x150 мм для визуального наблюдения за зоной заливки.

Привод поршня лотка раздаточной печи должен работать от установленного значения уровня расплава в лотке, но в безопасных пределах. При уменьшении уровня расплава (в процессе литья), поршень погружается в расплав, и обратно при доливании металла из плавильной печи, поршень возвращается в начальное положение. В пульте заложена возможность

перехода в ручной режим управления положением поршня и регулировки скорости хода поршня. В случае отключения электроэнергии в электромагнитном кристаллизаторе, поршень должен автоматически вернуться в начальное положение, предотвратив пролив металла.



Рисунок 1.9 - Лазерный датчик уровня

К внешней стороне леточного отверстия с помощью вытяжного механизма подводится затравочный пруток. Перед стартом литья в кристаллизатор подается вода и включается ТВЧ генератор индуктора кристаллизатора. Электромагнитный кристаллизатор (рисунок 1.10), представляет собой медный водоохлаждаемый или многовитковый индуктор.



Рисунок 1.10 – Индуктор электромагнитного кристаллизатора

Питание электромагнитного кристаллизатора осуществляется током повышенной частоты. В качестве источника питания используется транзисторный генератор ВГТ2-25/66 (рисунок 1.11) номинальной мощностью 25 кВт. На вход генератора подается трехфазное синусоидальное напряжение 380 В частотой 50 Гц. На выходе генератора напряжение составляет 600 В. Диапазон изменения частоты на выходе генератора составляет 50–100 кГц.



Рисунок 1.11 - Транзисторный генератор ВГТ5–25/66

Далее поднимается шток и металл из лотка поступает в кристаллизатор где кристаллизуется и схватывается с затравкой. Затем включается вытяжной механизм (рисунок 1.12) и начинается отвод прутка из зоны кристаллизации. Отлитый пруток далее подается на намотчик (рисунок 1.13) для его укладки в бухты диаметром 1,5 м и массой до 80 кг (рисунок 1.14). Установка обеспечивает производство прутка диаметром от 5 до 15 мм.

Вытяжной механизм представляет собой многоклетьевую машину с металлическими подпружиненными роликами и электроприводом. В роликах выполнена проточка для захвата и центровки слитка. Управление скоростью вращения роликов осуществляется посредством частотно управляемого привода. Задание скорости вращения роликов определяет скорость литья и производительность всего комплекса.

Намоточная машина, это вертикально расположенный намоточный барабан с собственным электроприводом. Режим работы намотчика – повторно кратковременный. Перед этим непрерывно литая заготовка поступает на вилку датчика провисания слитка (рисунок 1.13 (а)). Датчик провисания слитка, показанный на рисунке 1.13 (б), срабатывает исходя из длины вышедшего из вытяжного механизма заготовки.



а



б

Рисунок 1.12 - Механизм вытяжки слитка: а – блок электродвигателей, б – редуктор



а



б

Рисунок 1.13 - Механизм намотки в процессе работы: а - вилка датчика провисания слитка; б - датчик провисания слитка;



Рисунок 1.14 - Бухта непрерывнолитой заготовки диаметром 10мм

Управление намоточной машиной осуществляется с помощью частотного преобразователя Веспер E2-MINI-S3L (рисунок 1.15). Частотный преобразователь обеспечивает защиту двигателя от перегрузок, имеет аналоговые и цифровые входы/выходы для регулирования и дистанционного управления.



Рисунок 1.15 – Источник питания намотчика (частотный преобразователь Веспер E2 – MINI –S3L)

Так же в данном плавильно-литейном комплексе располагаются, размещенные на пульте управления, терморегуляторы ОВЕН ТРМ, рисунок 1.16, предназначенные для измерения, регистрации или регулирования температуры теплоносителей, а так же различных сред в холодильной технике, сушильных шкафах, печах различного назначения и другом технологическом оборудовании, и для измерения других физических параметров (веса, давления, влажности и т. п.) [10].



Рисунок 1.16 - Пульт управления

Одна «ТРМ 1» показывает температуру в печи, другая «ТРМ 1» – температуру литья. «ТРМ 101» показывает температуру расплава. «ТРМ 138» показывает температуру нагревательных ковриков.

2 Раздаточная печь с дозирующим устройством

Раздаточная печь - промышленная печь для подогрева расплавленного металла и поддержания его температуры в требуемых пределах (приложение А). Раздаточный лоток, показанный на рисунке 2.1, представляет собой стационарную печь с донным сливом. В металлокаркас лотка устанавливается огнеупорный тигель (5) сложной формы с лоточным отверстием и трапецевидным углублением. Снизу тигля устанавливаются электронагревательные коврики (КЭН) (6), (7). Максимальная температура на нагревательном элементе не более 1100 °С [5].

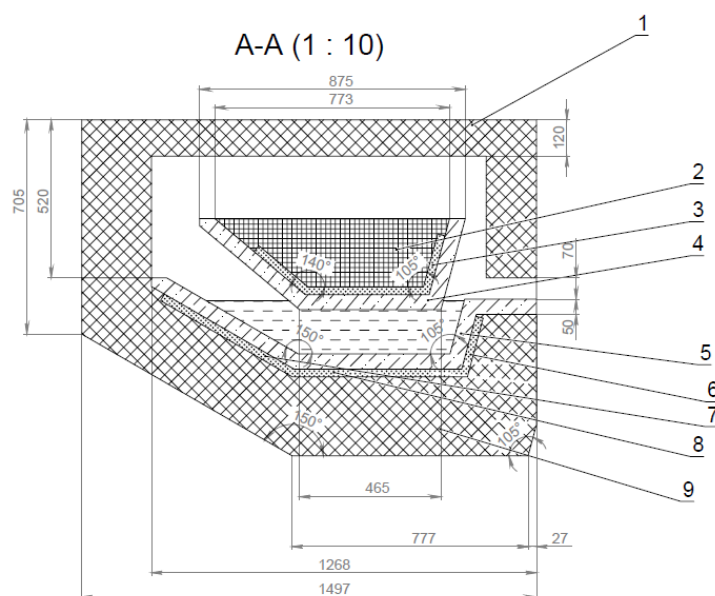


Рисунок 2.1 - Раздаточная печь с системой дозирования расплава

Заливка расплава происходит следующим образом: лоток прогревается до 700°С, шток литейного отверстия опускается (отверстие закрыто), затравка вставляется в литейный носик, поршень-регулятор поднимается (4), снимается первая секция крышки (1), заливается расплав из тигельной печи до уровня заливочного отверстия, устанавливается первая секция крышки, поршень-регулятор (4) опускается, уровень металла в лотке поднимается (относительно заливочного отверстия), шток литейного отверстия поднимается, расплав

поступает в носик и на затравку, затравка начинает движение вниз, происходит литье [5].

При снижении уровня расплава в лотке поршень-регулятор (4) опускается вниз, поддерживая требуемый уровень расплава. При срабатывании расплава из лотка, снимается первая секция крышки; начинается процесс заливки расплава из тигельной печи до уровня заливочного отверстия и параллельно поршень-регулятор (4) поднимается, что бы обеспечить поддержание требуемого уровня расплава в лотке. Процесс осуществляется до полного заполнения лотка, устанавливается первая секция крышки, литье продолжается [5].

Крышка лотка состоит из двух секций: первая секция закрывает зону заливочного кармана, вторая находится в зоне заливочного носика, датчика уровня и смотрового окна. Предусмотрена возможность быстрой замены огнеупорного картриджа. Литейный носик является быстросъемным элементом, вставляющимся в литейное отверстие огнеупорного картриджа. Это необходимо для его оперативной замены при аварии литья без демонтажа огнеупорного картриджа. Стенки огнеупорного картриджа выполнены со скосом для упрощения вытаскивания закристаллизовавшегося слитка при аварии. Футеровка выполнена с наклоном в зоне литейного носика для отвода металла при аварии литья. Шток предназначен для перекрытия литейного отверстия во время первоначального заполнения расплавом лотка. Аварийное перекрытие литейного отверстия при сбое литья[5].

Опора лотка позволяет перемещать лоток в горизонтальной плоскости. Точность регулирования 1 мм. Механизм перемещения лотка обеспечивает жесткую фиксацию лотка после установки положения. Регулирование необходимо для позиционирования заливочного отверстия лотка относительно индуктора, кристаллизатора и механизма отвода слитка [5].

2.1 Системы дозирования металла

2.1.1 Система дозирования расплава «поплавкового» типа

Система дозирования расплава «поплавкового» типа (рисунок 2.2) в установке непрерывной разливки содержит прилеточный карман (1), примыкающей к миксеру (2) с леткой (3), желоб (4), на днище которого установлена керамическая питающая насадка (5) с пробкой (6) и приводом (7) перемещения пробки (6) относительно питающей насадки (5). Питающая насадка (5) выполнена из износостойчивого к расплаву алюминия керамики, стенка (8) которой армирована внутри металлическими элементами (9). Питающая насадка (5) установлена в зоне кристаллизатора (10). Особенность питающей насадки (5), еще и в том, что ее канал (11), в верхней части, выполнен более расширенным, чем сам канал в целом и представляет собой конусный раструб (12) [6].

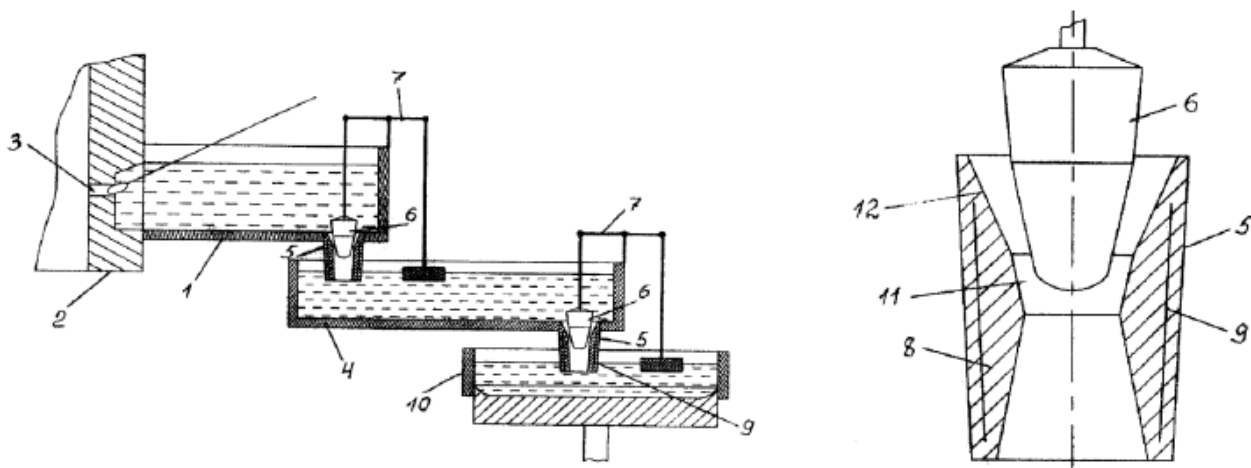


Рисунок 2.2 – Система дозирования расплава «поплавкового» типа

Принцип действия: Из миксера (2) через летку (3) расплавленный металл поступает в прилеточный карман (1) и далее через промежуточную питающую насадку (5), снабженную приводом (7) перемещения пробки (6), в желоб (4), на днище которого и под расплавом, находится основная питающая насадка (5).

Питающая насадка (5) снабженная приводом (7) перемещения пробки (6) установлена в кристаллизаторе (10), в который поступает расплавленный металл. Особенностью конструкции питающей насадки (5) является то, что она выполнена из керамики, износоустойчивой к расплаву алюминия и стенка (8), которой армирована металлическими элементами (9). Аналогичная питающая насадка (5) с пробкой (6) может быть установлена в прилеточном кармане (1) для стабилизации движения расплава [6].

2.1.2 Дозирование поворотом индукционной тигельной печью

Дозирование поворотной индукционной тигельной печью (рисунок 2.3) осуществляется без установки различных технологических устройств, и выполняется с помощью разливочного носика находящегося в верхней части печи, когда металл переходит в жидкое агрегатное состояние, и достигает нужной температуры, дозирование осуществляется поворотом печи, в сторону заполняемой емкости и металл стекает через сливной носик печи. Использование этого способа дозирования сводится только к небольшим печам, в связи с тем что, большие печи имеют большую массу, и нужно затрачивать большие ресурсы для того чтобы постоянно поворачивать печь [6].



Рисунок 2.3 – Дозирование поворотом индукционной тигельной печью

2.1.3 Дозирование индукционным насосом

Индукционный насос (рисунок 2.4), подающий электропроводящую жидкость с помощью электромагнитной силы, которая возникает от взаимодействия магнитного поля индуктора с полем электрического тока, индуктируемого в проходящей через насос среде.

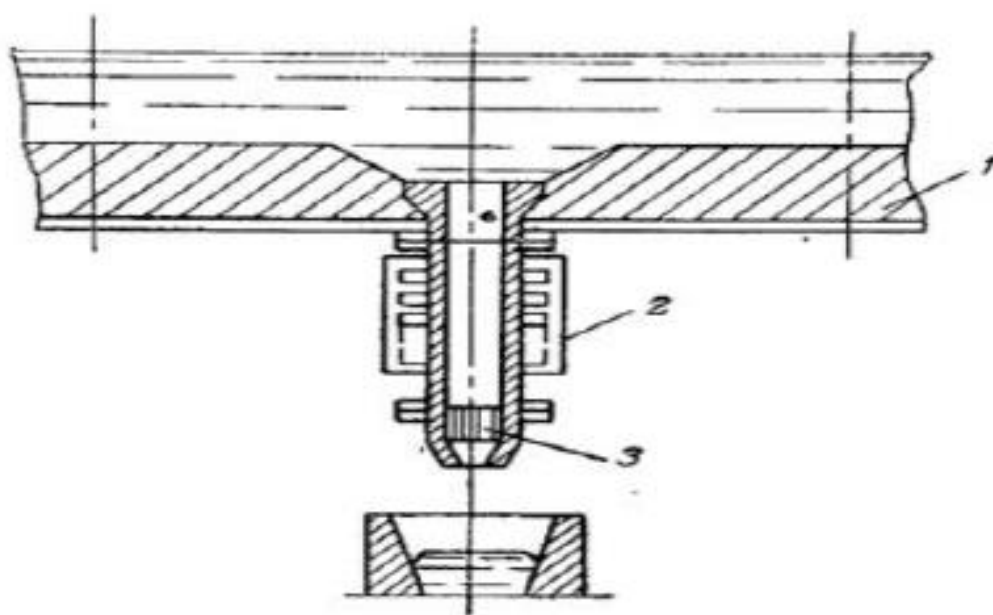


Рисунок 2.4 - Дозирование индукционным насосом

Принцип работы индукционного насоса: жидкий металл из емкости (1) поступает в рабочий канал насоса (2) и с помощью бегущего поля, направленного вниз, продавливается через пробку (3). После заполнения формы электромагнитный насос отключается, и доступ металла в форму прекращается благодаря наличию запирающей пробки. При дозировании с помощью индукционного насоса в перерывах между очередными включениями жидкий металл в нижней части устройства должен подогреваться с помощью внешнего или внутреннего обогревателя [6].

Размер пор или ячеек должен быть таким чтобы жидкий металл не мог пройти через эти отверстия под действием гидростатического давления в сосуде.

2.1.4 Система дозирования расплава с помощью погружного МГД насоса

Изобретение относится к области литейного производства, в частности к устройствам для дозирования и заливки жидкого металла. В этом устройстве электромагнитные системы частично или полностью находятся в контакте с жидким металлом. Это приводит к их интенсивному коррозионному разрушению. Указанные устройства не могут работать металлами, имеющими температуру плавления выше точки Кюри [6].

Погружной МГД насос (рисунок 2.5) состоит из разъемного корпуса (1), в плоскости разъема которого установлен канал (2) с металлопроводом (4) установлен электромагнит (5). Корпус (1) устройства стянут шпильками (6) с компенсаторами теплового расширения (7). В плоскости разъема установлено уплотнение (8) [6].

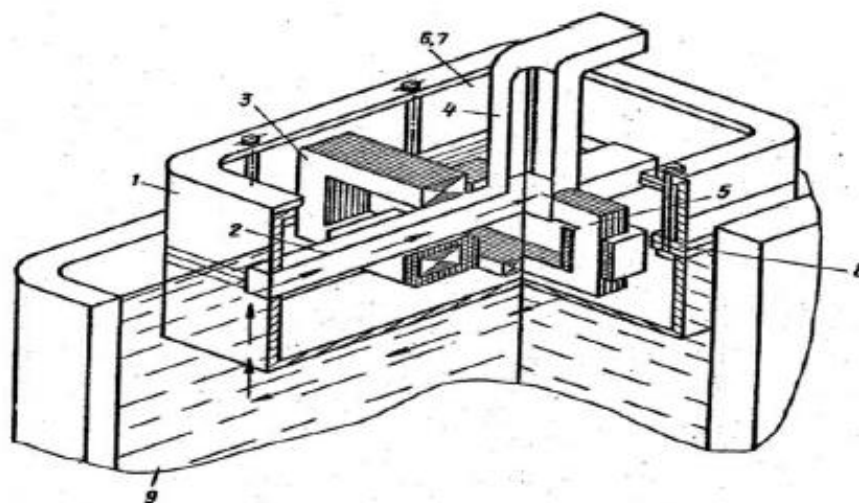


Рисунок 2.5 – Погружной МГД насос

Принцип работы: при погружении устройства в жидкий металл (9) до заполнения канала (2) возникает кольцо жидкого металла вокруг магнитопровода индуктора (3). В результате подачи напряжения на катушку индуктора (3) в канале (2) индуцируется электрический ток с пересекающим

его магнитным потоком, создаваемым электромагнитом (5), в металле возникает пандемоторные силы, которые обуславливают движение металла вдоль метллопровода (4) [6].

Недостатками такого устройства является увеличение вероятности проникновения жидкого металла внутрь корпуса и снижение надежности устройства из-за наличия трех плоскостей разъема [6].

Температура электромагнитных систем, зафутерованных в корпусе, с течением времени становится равной температуре перекачиваемого металла. Это снижает надежность работы устройства. Ремонт устройства является дорогим из-за необходимости замены целой секции, выполненной из дорогостоящей керамики [6].

2.2 Теплоизоляционные материалы, применяемые в раздаточной печи

Огнеупорный бетон NPC-21AC, рисунок 2.6 [8].



Рисунок 2.6 - Огнеупорный бетон

Предельная возможность сохранять заданные технические параметры - это основное свойство огнеупорных материалов, которые сначала при затвердевании становятся подобны камню, а в эксплуатации выдерживают длительное воздействие сверхвысокой температуры. С такими характеристиками выпускается огнеупорный бетон - особая марка

стройматериала, который применяется для нестандартных работ. Особенности жаропрочных бетонов: высокая огнеупорность, прочность, повышение эксплуатационных свойств в процессе работы, отсутствие в технологии производства сложного, дорогостоящего процесса обжига [8].

Бетон легковес ВГТБС – 1,0. Высокоглиноземистыми называются изделия, содержащие глинозема более 45%. Для их изготовления используют главным образом технический глинозем с добавлением огнеупорной глины [8].

Высокоглиноземистые огнеупоры применяют для футеровки сталеразливочных, промежуточных и чугуновозных ковшей, скользящих затворов ковшей, сводов электродуговых печей, лещади и горна домен, печей, воздухонагревателей нагревательных печей и др. тепловых агрегатов с рабочей температурой выше 1300-1350°C, а также в качестве стаканов для разлива стали, трубок для термопар и др. Неформованные высокоглиноземистые огнеупоры типа МЛ и МК применяют в виде набивных масс (для сталеразливочных ковшей), заполнителей огнеупорных бетонов, мертелей и т.п. [8].

Картон теплоизоляционный МКРКЛ- 450 (рисунок 2.7). Обладает высокой механической прочностью, проявляет отличные теплоизоляционные свойства при повышенных температурах. Успешно заменяет асбестовые материалы [7].

Муллитокремнеземистый высокотемпературный огнеупорный теплоизолирующий картон марки - МКРКЛ 450 (плотность 400 кг/м³). Температура применения не выше 1300°C. Применяется в качестве разовых конусов для стопоров леточных отверстий в печах плавки и выдержки алюминия; в качестве компенсационных прокладок рабочего слоя футеровки стен и подвесных сводов в газоотражательных печах с рабочей температурой 1100°C; для заполнения температурных швов; для теплоизоляции термических и нагревательных печей, трубопроводов; ликвидации зазора между изложницей и прибыльной надставкой при разливе стали; для защиты кожуха сталеразливочного ковша от перегрева и др [7].

Обладает высокой механической прочностью, проявляет отличные теплоизоляционные свойства при повышенных температурах. Успешно заменяет асбестовые материалы с большим запасом жаропрочности. Муллитокремнеземистый высокотемпературный огнеупорный теплоизоляционный картон, экологически чистый и безопасный материал [7].



Рисунок 2.7 - Картон теплоизоляционный МКРКЛ- 450

Пенодиатомитовый кирпич (КПД) представляет собой стеновой блок параметрами 246x122x64 миллиметра. Сами КПД делают из диатомита, который успешно добывают в России в Инзенском месторождении. Это особенное месторождение, поскольку там диатомит наиболее чист и не требует очищения после добычи [7].

В нем содержатся оксиды следующих элементов: кремний (85%), железо (6%), алюминий (3%), титан, натрий, магний, калий, кальций.

Отличие КПД от ближайших по свойствам материалов: огнеупорность, этот материал был разработан в качестве недорогой и экономной (в плане сырья) альтернативы шамотному кирпичу (КШ). Недостатки КШ: большая масса блока и кладки, не имеет адгезии к цементным растворам, монтаж только на глину или дорогие спецрастворы, непрочный блок может расколоться от падения, большой расход природного сырья.

В КПД все эти недостатки были ликвидированы за счёт использования диатомита и пено-пористой структуры, которая дала необходимую адгезию. Объёмная масса блока также уменьшилась в 2–2,5 раза за счёт вспенивания сырья [7].

Несущая способность. В качестве несущего элемента ближайшие «конкуренты» - красный клинкерный и белый силикатный кирпичи. Эти заслуженные участники строительства имеют бесспорные показатели по прочности и несущей способности, ставшие эталонными. При этом один на всех недостаток - большой объёмный вес, заставивший инженеров разрабатывать альтернативу. На практике оказалось, что разреженные (вспененные) материалы теряют несущую способность - у них изменяется кристаллическая решётка. Здесь на первый план снова вышел диатомит, имеющий в составе огромное количество кремния, титан, алюминий и железо. Такой баланс позволил сохранить вспененному блоку конкурентные несущие характеристики. При этом объёмный вес составил всего 450–500 кг/м³ против 1800–2200 кг/м³ у «конкурентов». Несущая способность КПД повторяет возможности красного и силикатного «собратьев», разве что с более высоким стартовым порогом: красный от М75 (0,75 МПа) до М300 (3 МПа), силикатный М110 (1,1 МПа) до М150 (1,5 МПа), пенодиатомитовый - от КПД-400 (1,5 МПа) до КПД-500 (2,5 МПа). Теплоизоляция КПД-400 (при t менее 100 °С) - 0,05 Вт/м·°С.

Данный материал применяют во всех областях промышленности и жилого строительства. Он абсолютно экологичен (впрочем, как и «конкуренты»), при этом обладает внушительными несущими, тепло- шумоизолирующими и огнеупорными свойствами. Максимальная рабочая температура всех трёх марок - 900 °С [7].

2.3 Электронагревательные коврики (КЭН)

Изготовленные из термостойких материалов нагревательные коврики (приложение Г), известные также под названием КЭН (рисунок 2.8), маты бокового нагрева или маты продольного нагрева, способны работать при температуре до 1200°C и могут включаться как от термообрабатывающих установок, так и от сварочных трансформаторов. Многожильный сердечник из нихромовой или специальной проволоки электрически изолирован нанизанными и соединенными между собой керамическими бусинами из глинозема (корундовой керамики), обеспечивающими высокую теплопроводность ковриков и надежную электробезопасность. Холодные концы нагревателей выполнены из многожильной никелевой проволоки с низким сопротивлением для снижения температуры на разъеме. Изоляторы разъёмов выполнены из специального эпоксидного стекломатериала, выдерживающего температуру до 260°C [9].

Стандартно все коврики изготавливаются с использованием 19-ти жильного нагревательного сердечника и используются для выполнения термообработки с максимальной температурой на изделии 1050 °С.

При выполнении термообработки с более высокими температурами используется специальный фехралевый сердечник FeCr. С помощью таких ковриков достигаются температуры до 1200 °С [9].



Рисунок 2.8 - Электронагревательный коврик (КЭН)

2.4 Тепловой расчёт электрической раздаточной печи с дозирующим устройством, емкостью 130 кг

В программе Mathcad был произведен тепловой расчёт электрической раздаточной печи с дозирующим устройством емкостью 130 кг, общие данные приведены в таблице 2.1 [10].

Таблица 2.1 - Общие данные

Параметр	Мера измерения	Значение
Температура расплава	К	446
Температура окр. среды	К	293
Температура нагревателей	К	623
Коэффициент теплоотдачи (Тигель-алюминий)	$\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	300
Коэффициент теплоотдачи (Окружающей среды)	$\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	12
Теплоёмкость алюминия	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	903
Удельная теплота плавления алюминия	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	390
Начальная температура алюминия	К	293
Температура плавления алюминия	К	933
Температура перегрева алюминия	К	1003
Удельная теплота необходимая для плавления алюминия	$\frac{1}{\text{кг}} \cdot \text{Дж}$	390
Удельное сопротивление нагреваемых элементов	$\frac{\text{Ом}}{\text{м}^2}$	29,5
Номинальный ток нагреваемых элементов	А	40

Удельная теплота необходимая для нагрева алюминия $\frac{1}{\text{кг}} \cdot \text{Дж}$:

$$q_{\text{НАГ}} = c_p \cdot (T_{\text{ПЛ}} - T_0) = 903 \cdot (933 - 293) = 5,8 \cdot 10^5. \quad (2.1)$$

Удельная теплота необходимая для перегрева $\frac{1}{\text{кг}} \cdot \text{Дж}$:

$$q_{\text{ПЕР}} = c_{\text{АЛ}} \cdot (T_{\text{ЛИТ}} - T_{\text{ПЛ}}) = 903 \cdot (1003 - 933) = 6,32 \cdot 10^4. \quad (2.2)$$

Общая теплота плавления $\frac{1}{\text{кг}} \cdot \text{Дж} :$

$$q_{\text{ОБЩ}} = q_1 + q_2 + q_3 = 5,8 \cdot 10^5 + 3,9 \cdot 10^5 + 6,32 \cdot 10^4 = 1,03 \cdot 10^6. \quad (2.3)$$

Таблица 2.2 - Площадь КЭН

Номер КЭН	Площадь КЭН, м ²
№1 и №2 (лоток)	0,128
№3 и №4 (лоток)	0,187
№5 и №6 (лоток)	0,183
№7 (поршень)	0,255

Сопротивления нагревателей, Ом:

$$R_{\delta 1} = S_{\delta 1} \cdot r_{\text{уд}} = 0,128 \cdot 29,5 = 3,77; \quad (2.4)$$

$$R_{\delta 2} = S_{\delta 2} \cdot r_{\text{уд}} = 0,187 \cdot 29,5 = 5,5; \quad (2.5)$$

$$R_{\delta 3} = S_{\delta 3} \cdot r_{\text{уд}} = 0,183 \cdot 29,5 = 5,4; \quad (2.6)$$

$$R_{\delta 4} = S_{\delta 4} \cdot r_{\text{уд}} = 0,183 \cdot 29,5 = 5,4; \quad (2.7)$$

$$R_{\delta 5} = S_{\delta 5} \cdot r_{\text{уд}} = 0,255 \cdot 29,5 = 7,52. \quad (2.8)$$

Напряжения нагревателей, В:

$$U_{\text{НОМ}_{\delta 1}} = R_{\delta 1} \cdot I_{\text{НОМ}} = 3,77 \cdot 40 = 151,04; \quad (2.9)$$

$$U_{\text{НОМ}_\delta 2} = R_{\delta 2} \cdot I_{\text{НОМ}} = 5,5 \cdot 40 = 220,66; \quad (2.10)$$

$$U_{\text{НОМ}_\delta 3} = R_{\delta 3} \cdot I_{\text{НОМ}} = 5,4 \cdot 40 = 215,94; \quad (2.11)$$

$$U_{\text{НОМ}_\delta 4} = R_{\delta 4} \cdot I_{\text{НОМ}} = 5,4 \cdot 40 = 215,94; \quad (2.12)$$

$$U_{\text{НОМ}_\delta 5} = R_{\delta 5} \cdot I_{\text{НОМ}} = 7,52 \cdot 40 = 300,9. \quad (2.13)$$

Мощности нагревателей, кВт:

$$P_{\delta 1} = U_{\text{НОМ}_\delta 1} \cdot I_{\text{НОМ}} = 151,04 \cdot 40 = 6,04; \quad (2.14)$$

$$P_{\delta 2} = U_{\text{НОМ}_\delta 2} \cdot I_{\text{НОМ}} = 220,66 \cdot 40 = 8,83; \quad (2.15)$$

$$P_{\delta 3} = U_{\text{НОМ}_\delta 3} \cdot I_{\text{НОМ}} = 215,94 \cdot 40 = 8,64; \quad (2.16)$$

$$P_{\delta 4} = U_{\text{НОМ}_\delta 4} \cdot I_{\text{НОМ}} = 215,94 \cdot 40 = 8,64; \quad (2.17)$$

$$P_{\delta 5} = U_{\text{НОМ}_\delta 5} \cdot I_{\text{НОМ}} = 300,9 \cdot 40 = 12,04. \quad (2.18)$$

Общая площадь нагревателей, м²:

$$S_{\text{НАГР}} = 2 \cdot S_{\delta 1} + 2 \cdot S_{\delta 2} + S_{\delta 3} + S_{\delta 4} + S_{\delta 5} = 2 \cdot 0,128 + 2 \cdot 0,187 + 0,183 + 0,183 + 0,255 = 1,251 \quad (2.19)$$

Общая площадь нагревателей (без нагревателя на подвижном поршне), м²:

$$S_{\text{НАГР}_1} = 2 \cdot S_{\delta_1} + 2 \cdot S_{\delta_2} + S_{\delta_3} + S_{\delta_4} = 2 \cdot 0,128 + 2 \cdot 0,187 + 0,183 + 0,183 = 0,996. \quad (2.20)$$

Общее сопротивление и общая мощность нагревателей, Ом и кВт:

$$R_{\text{ОБЩ}} = r_{\text{УД}} \cdot S_{\text{НАГР}} = 29,5 \cdot 1,251 = 36,9; \quad (2.21)$$

$$P_{\text{ОБЩ}} = I_{\text{НОМ}}^2 \cdot R_{\text{ОБЩ}} = 40^2 \cdot 36,9 = 59,05. \quad (2.22)$$

Общее сопротивление и общая мощность нагревателей (без нагревателей на подвижном поршне), Ом и кВт:

$$R_{\text{ОБЩ}_1} = r_{\text{УД}} \cdot S_{\text{НАГР}_1} = 29,5 \cdot 0,996 = 29,38; \quad (2.23)$$

$$P_{\text{ОБЩ}_1} = I_{\text{НОМ}}^2 \cdot R_{\text{ОБЩ}_1} = 40^2 \cdot 29,38 = 47,01. \quad (2.24)$$

Тепловые потери через корпус, кВт:

$$P_{\text{П.К.}} = \frac{T_{\text{НАГР}} - T_{\text{ОКР}}}{\frac{1}{\alpha_{\text{ОКР}}} + \frac{\delta_2}{\lambda_{\text{КПД}}}} \cdot S_{\text{В.К.}} = \frac{623 - 293}{\frac{1}{12} + \frac{0,26}{0,15}} \cdot 8,5 = 1,54, \quad (2.25)$$

где δ_2 - толщина наружной теплоизоляции (кирпич пенодиатомитовый), м;

$\lambda_{\text{КПД}}$ - коэффициент теплопроводности кирпича пенодиатомитового, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$;

$\alpha_{\text{ОКР}}$ - коэффициент теплоотдачи окружающей среды, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$;

$S_{\text{В.К.}}$ - площадь поверхности корпуса (данные из SolidWorks), м^2 .

Температура внешней поверхности корпуса, К:

$$T_{\text{ПОВ}} = \frac{P_{\text{П.К.}}}{\alpha_{\text{ОКР}} \cdot S_{\text{В.К.}}} + T_{\text{ОКР}} = \frac{1540}{12 \cdot 8,5} + 293 = 308. \quad (2.26)$$

Заполнение печи расплавом на 25% (55мм):

Площадь подвижного поршня $S_{\text{П}} = 0,2 \text{ м}^2$

Площадь расплава контактирующего со стенками тигля с подвижным поршнем (данные из SolidWorks), м^2 :

$$S_{1_{25\%}} = 0,2 + 0,361 = 0,561. \quad (2.27)$$

Площадь расплава контактирующего со стенками тигля без подвижного поршня (данные из SolidWorks), м^2 :

$$S_{2_{25\%}} = S_{1_{25\%}} - 0,2 = 0,361. \quad (2.28)$$

Тепловой поток в расплаве с подвижным поршнем, кВт:

$$Q_{1_{25\%}} = \frac{T_{\text{НАГР}} - T_{\text{Р}}}{\frac{1}{\alpha_{\text{Р}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_{\text{ОГ.БЕТ}}}} \cdot S_{1_{25\%}} = \frac{623 - 446}{\frac{1}{300} + \frac{0,05}{10}} \cdot 0,561 = 11,92, \quad (2.29)$$

где $\alpha_{\text{Р}}$ - коэффициент теплоотдачи расплава, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$;

δ_1 - толщина бетонного тигля, м;

$\lambda_{\text{ОГ.БЕТ}}$ - коэффициент теплопроводности огнеупорного бетона, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$.

Тепловой поток в расплаве без подвижного поршня, кВт:

$$Q_{2_25\%} = \frac{T_{\text{НАГР}} - T_{\text{Р}}}{\frac{1}{\alpha_{\text{Р}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_{\text{ОГ.БЕТ}}}} \cdot S_{2_25\%} = \frac{623-446}{\frac{1}{300} + \frac{0,05}{10}} \cdot 0,361 = 7,67. \quad (2.30)$$

Производительность по плавлению в час с подвижным поршнем, кг:

$$P_{1_25\%} = \frac{Q_{1_25\%} \cdot 3600}{Q_{\text{ОБЩ}}} = \frac{11,92 \cdot 3600}{1,03 \cdot 10^6} = 41,601. \quad (2.31)$$

Производительность по плавлению в час без подвижного поршня, кг:

$$P_{2_25\%} = \frac{Q_{2_25\%} \cdot 3600}{Q_{\text{ОБЩ}}} = \frac{7,67 \cdot 3600}{1,03 \cdot 10^6} = 26,77. \quad (2.32)$$

Увеличение скорости плавления за счёт использования поршня, %:

$$\eta_{25\%} = \frac{P_{1_25\%} - P_{2_25\%}}{P_{1_25\%}} = \frac{41,601 - 26,77}{41,601} \cdot 100\% = 35,65. \quad (2.33)$$

Заполнение печи расплавом на 50%, 100мм:

Площадь расплава контактирующего со стенками тигля с подвижным поршнем (данные из SolidWorks), м²:

$$S_{1_50\%} = 0,2 + 0,482 = 0,682. \quad (2.34)$$

Площадь расплава контактирующего со стенками тигля без подвижного поршня (данные из SolidWorks), м²:

$$S_{2_50\%} = S_{1_50\%} - 0,2 = 0,482. \quad (2.35)$$

Тепловой поток в расплаве с подвижным поршнем, кВт:

$$Q_{1_50\%} = \frac{T_{\text{НАГР}} - T_{\text{Р}}}{\frac{1}{\alpha_{\text{Р}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_{\text{ОГ.БЕТ}}}} \cdot S_{1_50\%} = \frac{623 - 446}{\frac{1}{300} + \frac{0,05}{10}} \cdot 0,682 = 14,5, \quad (2.36)$$

где $\alpha_{\text{Р}}$ - коэффициент теплоотдачи расплава, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$;

δ_1 - толщина бетонного тигля, м;

$\lambda_{\text{ОГ.БЕТ}}$ - коэффициент теплопроводности огнеупорного бетона, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$.

Тепловой поток в расплаве без подвижного поршня, кВт:

$$Q_{2_50\%} = \frac{T_{\text{НАГР}} - T_{\text{Р}}}{\frac{1}{\alpha_{\text{Р}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_{\text{ОГ.БЕТ}}}} \cdot S_{2_50\%} = \frac{623 - 446}{\frac{1}{300} + \frac{0,05}{10}} \cdot 0,482 = 10,29. \quad (2.37)$$

Производительность по плавлению в час с подвижным поршнем, кг:

$$P_{1_50\%} = \frac{Q_{1_50\%} \cdot 3600}{Q_{\text{ОБЩ}}} = \frac{14,5 \cdot 3600}{1,03 \cdot 10^6} = 50,57. \quad (2.38)$$

Производительность по плавлению в час без подвижного поршня, кг:

$$P_{2_50\%} = \frac{Q_{2_50\%} \cdot 3600}{Q_{\text{ОБЩ}}} = \frac{10,29 \cdot 3600}{1,03 \cdot 10^6} = 35,74. \quad (2.39)$$

Увеличение скорости плавления за счёт использования поршня, %:

$$\eta_{50\%} = \frac{P_{1_50\%} - P_{2_50\%}}{P_{1_50\%}} = \frac{50,57 - 35,74}{50,57} = 29,3. \quad (2.40)$$

Заполнение печи расплавом на 75%, 145мм:

Площадь расплава контактирующего со стенками тигля с подвижным поршнем (данные из SolidWorks), м²:

$$S_{1_{75\%}} = 0,2 + 0,61 = 0,81. \quad (2.41)$$

Площадь расплава контактирующего со стенками тигля без подвижного поршня (данные из SolidWorks), м²:

$$S_{2_{75\%}} = S_{1_{75\%}} - 0,2 = 0,61. \quad (2.42)$$

Тепловой поток в расплаве с подвижным поршнем, кВт:

$$Q_{1_{75\%}} = \frac{T_{\text{НАГР}} - T_{\text{Р}}}{\frac{1}{\alpha_{\text{Р}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_{\text{ОГ.БЕТ}}}} \cdot S_{1_{75\%}} = \frac{623 - 446}{\frac{1}{300} + \frac{0,05}{10}} \cdot 0,81 = 17,2, \quad (2.43)$$

где $\alpha_{\text{Р}}$ - коэффициент теплоотдачи расплава, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$;

δ_1 - толщина бетонного тигля, м;

$\lambda_{\text{ОГ.БЕТ}}$ - коэффициент теплопроводности огнеупорного бетона, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$.

Тепловой поток в расплаве без подвижного поршня, кВт:

$$Q_{2_{75\%}} = \frac{T_{\text{НАГР}} - T_{\text{Р}}}{\frac{1}{\alpha_{\text{Р}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_{\text{ОГ.БЕТ}}}} \cdot S_{2_{75\%}} = \frac{623 - 446}{\frac{1}{300} + \frac{0,05}{10}} \cdot 0,61 = 12,96. \quad (2.44)$$

Производительность по плавлению в час с подвижным поршнем, кг:

$$P_{1_{75\%}} = \frac{Q_{1_{75\%}} \cdot 3600}{Q_{\text{ОБЩ}}} = \frac{17,2 \cdot 3600}{1,03 \cdot 10^6} = 60,06. \quad (2.45)$$

Производительность по плавлению в час без подвижного поршня, кг:

$$P_{2_{75\%}} = \frac{Q_{2_{75\%}} \cdot 3600}{Q_{\text{ОБЩ}}} = \frac{12,96 \cdot 3600}{1,03 \cdot 10^6} = 45,235. \quad (2.46)$$

Увеличение скорости плавления за счёт использования поршня, %:

$$\eta_{75\%} = \frac{P_{1_{75\%}} - P_{2_{75\%}}}{P_{1_{75\%}}} = \frac{60,06 - 45,235}{60,06} \cdot 100\% = 24,7. \quad (2.47)$$

Заполнение печи расплавом на 100%, 175мм:

Площадь расплава контактирующего со стенками тигля с подвижным поршнем (данные из SolidWorks), м²:

$$S_{1_{100\%}} = 0,2 + 0,716 = 0,916. \quad (2.48)$$

Площадь подвижного поршня $S_{\Pi} = 0,2$ м²:

Площадь расплава контактирующего со стенками тигля без подвижного поршня (данные из SolidWorks), м²:

$$S_{2_{100\%}} = S_{1_{100\%}} - 0,2 = 0,716. \quad (2.49)$$

Тепловой поток в расплаве без подвижного поршня, кВт:

$$Q_{2_{100\%}} = \frac{T_{\text{НАГР}} - T_{\text{П}}}{\frac{1}{\alpha_{\text{П}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_{\text{ОГ.БЕТ}}}} \cdot S_{2_{100\%}} = \frac{623 - 446}{\frac{1}{300} + \frac{0,05}{10}} \cdot 0,716 = 15,2, \quad (2.50)$$

где α_p - коэффициент теплоотдачи расплава, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$;

δ_1 - толщина бетонного тигля, м;

$\lambda_{\text{ОГ.БЕТ}}$ - коэффициент теплопроводности огнеупорного бетона, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$.

Тепловой поток в подвижном поршне, кВт:

$$Q_{\text{П}} = \frac{T_{\text{НАГР1}} - T_{\text{Р}}}{\frac{1}{\alpha_p} + \frac{\delta_1}{\lambda_{\text{ОГ.БЕТ}}}} \cdot S_{\text{П}} = \frac{623 - 446}{\frac{1}{300} + \frac{0,05}{10}} \cdot 0,2 = 4,28. \quad (2.51)$$

Тепловой поток в расплаве с подвижным поршнем, кВт:

$$Q_{1_100\%} = Q_{2_100\%} + Q_{\text{П}} = 15,2 + 4,28 = 19,5. \quad (2.52)$$

Производительность по плавлению в час с подвижным поршнем, кг:

$$P_{1_100\%} = \frac{Q_{1_100\%} \cdot 3600}{Q_{\text{ОБЩ}}} = \frac{19,5 \cdot 3600}{1,03 \cdot 10^6} = 68,125. \quad (2.53)$$

Производительность по плавлению в час без подвижного поршня, кг:

$$P_{2_100\%} = \frac{Q_{2_100\%} \cdot 3600}{Q_{\text{ОБЩ}}} = \frac{15,2 \cdot 3600}{1,03 \cdot 10^6} = 53,125. \quad (2.54)$$

Увеличение скорости плавления за счёт использования поршня, %:

$$\eta_{100\%} = \frac{P_{1_100\%} - P_{2_100\%}}{P_{1_100\%}} = \frac{68,125 - 53,125}{68,125} \cdot 100\% = 22. \quad (2.55)$$

3 Экспериментальные измерения величин раздаточной печи с дозирующим устройством

В программном пакете ANSYS была смоделирована раздаточная печь, ёмкостью 130 кг, с протекающими в ней тепловыми процессами, а именно:

1. Измерение времени нагрева металла от 20°C до 660°C (таблица 3.1);
2. Изменение времени нагрева металла от 680°C до 830°C (таблица 3.2);
3. Измерение температуры перегрева металла от 20°C до 660°C (таблица 3.3);
4. Измерение температуры перегрева металла от 680°C до 830°C (таблица 3.4);
5. Измерение времени переходного процесса до установившегося режима от 20°C до 660°C (таблица 3.5);
6. Измерение времени переходного процесса до установившегося режима от 680°C до 830°C (таблица 3.6);

В процессе измерений было произведено изменение следующих величин (таблица 3.7):

1. Коэффициент теплопроводности ($\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$);
2. " ΔT ", который определяет пороговую температуру металла, равную $T_{\text{пор}} = T_{\text{зад}} - \Delta T$, при которой происходит плавное снижение мощности нагревателей с целью снижения величины перегрева металла выше $T_{\text{зад}}$.

Таблица 3.1 - Экспериментальные измерения времени нагрева металла от 20°C до 660°C в раздаточной печи с дозирующим устройством

	$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$				
$\Delta T, ^\circ\text{C}$	1	2	5	10	15
0	Недогрев	133 мин	96 мин	92 мин	90 мин
50	Недогрев	133 мин	96 мин	92 мин	90 мин
75	Недогрев	133 мин	96 мин	92 мин	90 мин
100	Недогрев	133 мин	96 мин	92 мин	90 мин

Таблица 3.2 - Экспериментальные измерения времени нагрева металла от 680°C до 830°C в раздаточной печи с дозирующим устройством

$\Delta T, ^\circ C$	$\lambda, \frac{Вт}{м \cdot К}$				
	1	2	5	10	15
0	144 мин	82 мин	42 мин	30 мин	25 мин
50	144 мин	82 мин	42 мин	30 мин	25 мин
75	144 мин	82 мин	42 мин	30 мин	25 мин
100	144 мин	82 мин	42 мин	30 мин	25 мин

Таблица 3.3 - Экспериментальные измерения температур перегрева металла в раздаточной печи с дозирующим устройством. Нагрев от 20°C до 660°C

$\Delta T, ^\circ C$	$\lambda, \frac{Вт}{м \cdot К}$				
	1	2	5	10	15
0	Недогрев	До 740°C	До 730°C	До 700°C	До 690°C
50	Недогрев	До 730°C	До 720°C	До 690°C	До 670°C
75	Недогрев	До 720°C	До 705°C	До 680°C	Без перегрева
100	Недогрев	До 710°C	До 700°C	Без перегрева	Без перегрева

Таблица 3.4 - Экспериментальные измерения температур перегрева металла в раздаточной печи с дозирующим устройством. Нагрев от 680°C до 830°C

$\Delta T, ^\circ C$	$\lambda, \frac{Вт}{м \cdot К}$				
	1	2	5	10	15
0	До 850°C	До 870°C	До 870°C	До 870°C	До 870°C
50	До 845°C	До 860°C	До 860°C	До 860°C	До 860°C
75	До 845°C	До 860°C	До 860°C	До 860°C	До 840°C
100	До 845°C	До 860°C	До 860°C	До 850°C	Без перегрева

Таблица 3.5 - Экспериментальные измерения времени переходного процесса до установившегося режима в раздаточной печи с дозирующим устройством. Нагрев от 20°C до 660°C

	$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$				
$\Delta T, ^\circ\text{C}$	1	2	5	10	15
0	Не устан.	Не устан.	37 мин	19 мин	10 мин
50	Не устан.	Не устан.	37 мин	19 мин	10 мин
75	Не устан.	Не устан.	37 мин	19 мин	10 мин
100	Не устан.	Не устан.	37 мин	19 мин	10 мин

Таблица 3.6 - Экспериментальные измерения времени переходного процесса до установившегося режима в раздаточной печи с дозирующим устройством. Нагрев от 680°C до 830°C

	$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$				
$\Delta T, ^\circ\text{C}$	1	2	5	10	15
0	Не устан.	51 мин	29 мин	6 мин	9 мин
50	Не устан.	51 мин	29 мин	6 мин	9 мин
75	Не устан.	51 мин	29 мин	6 мин	9 мин
100	Не устан.	51 мин	29 мин	6 мин	9 мин

В программе ANSYS, после расчетов, в результате от изменения коэффициента теплопроводности ($\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$), были зафиксированы следующие карты температурного поля рисунок 3.1 - рисунок 3.6. Как видно на представленных картах, нагреватели, при низком значении коэффициента теплопроводности перегриваются, а металл не догревается до заданной температуры. При коэффициенте теплопроводности 5 и более, достигается требуемая температура нагрева металла.

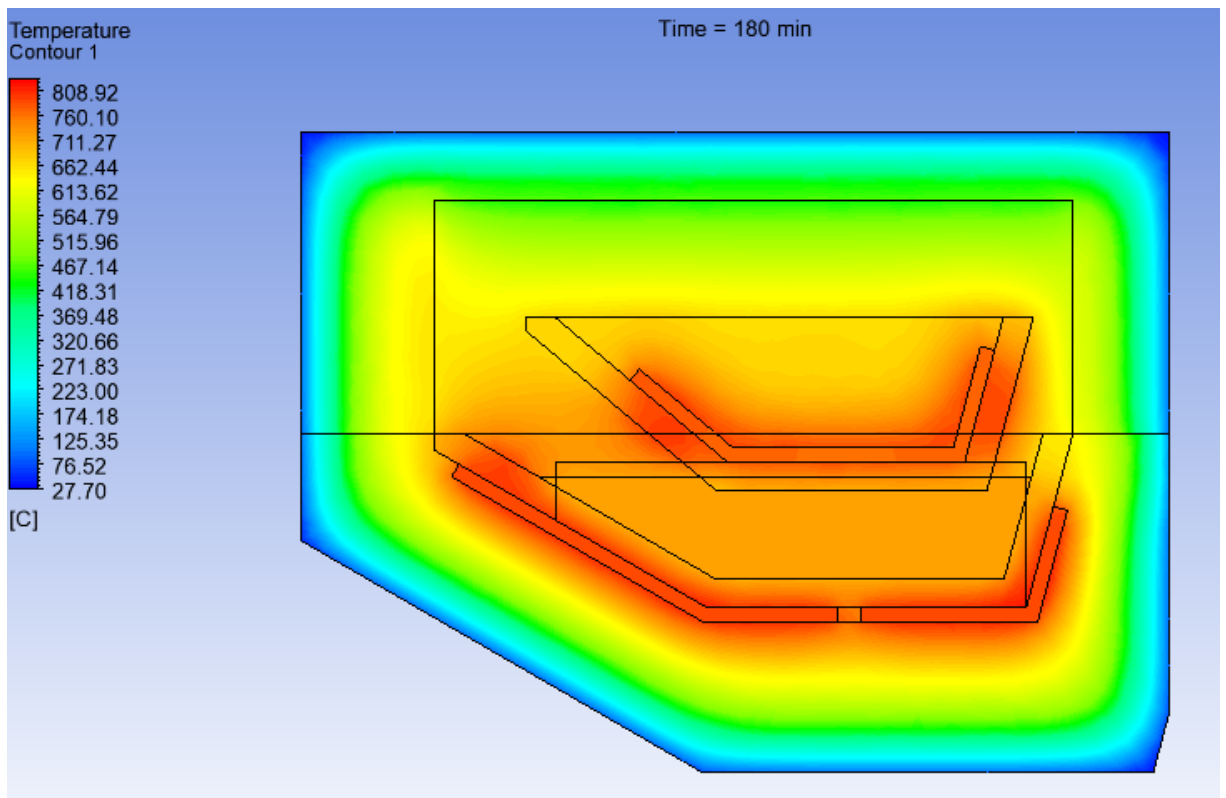


Рисунок 3.1 - $\lambda=1 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$, при нагреве от 20°C до 660°C

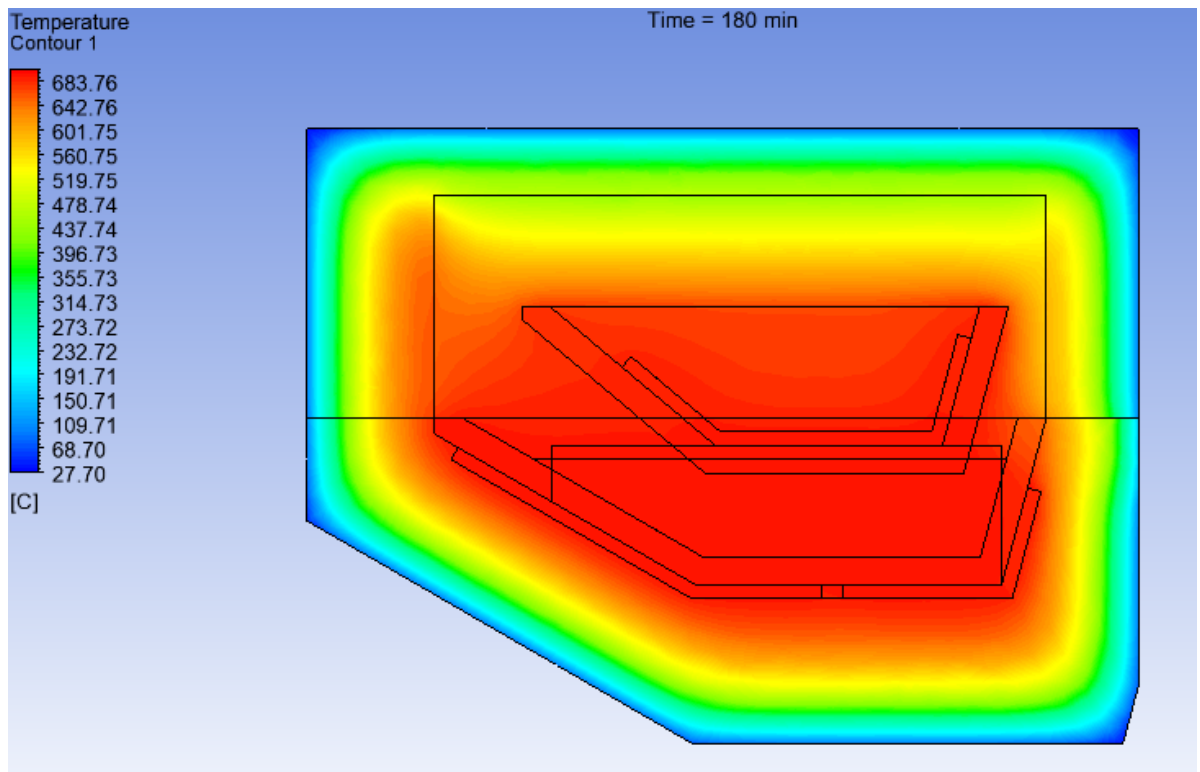


Рисунок 3.2 - $\lambda=5 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$, при нагреве от 20°C до 660°C

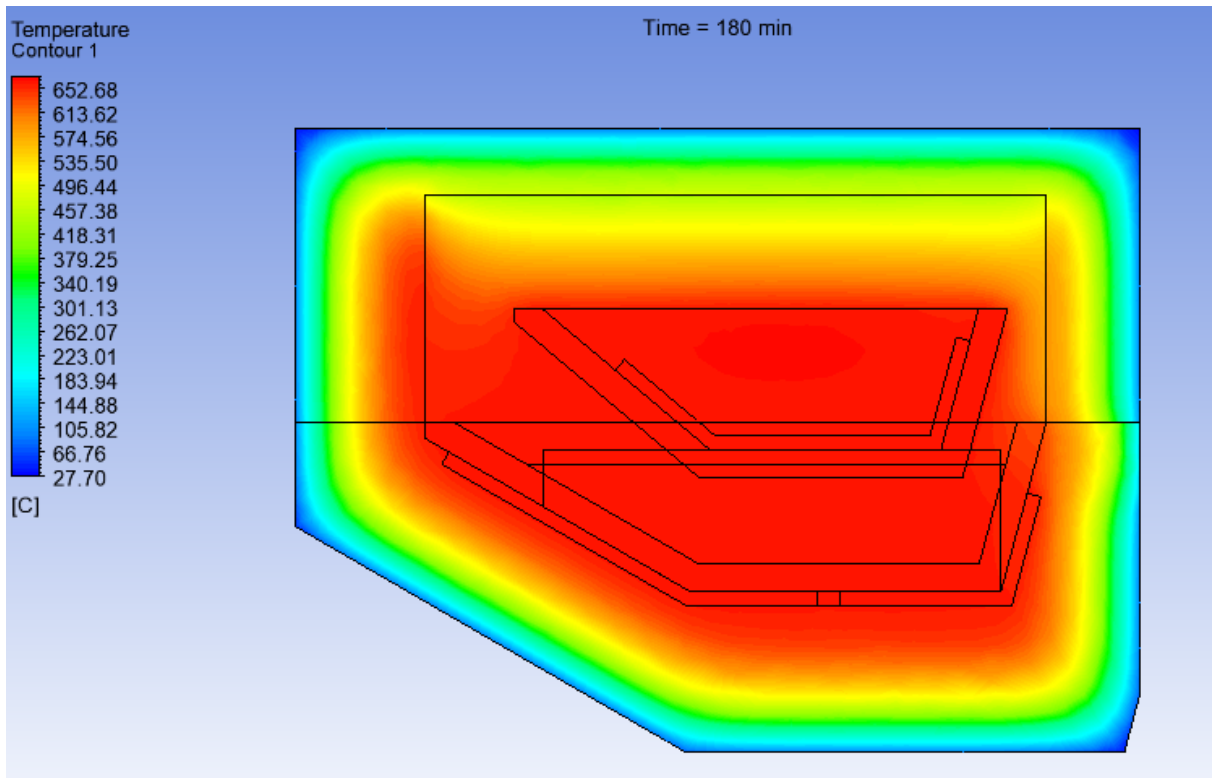


Рисунок 3.3 - $\lambda=15 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$, при нагреве от 20°C до 660°C

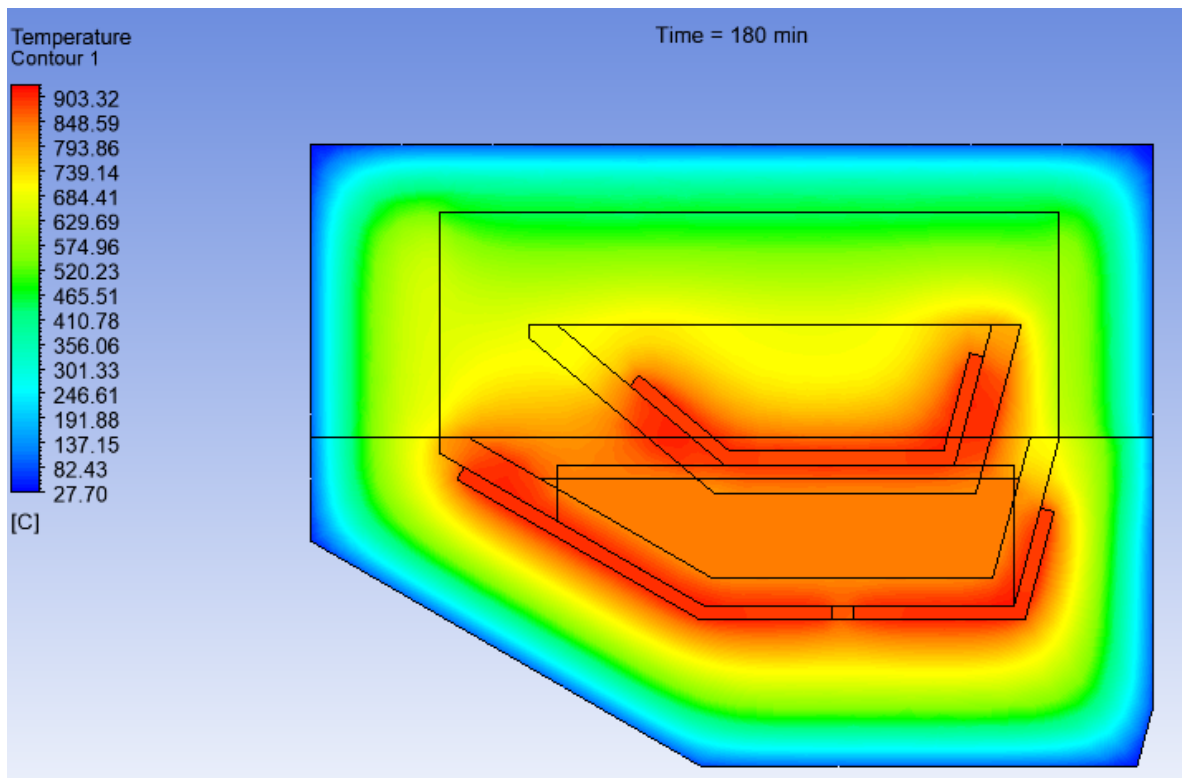


Рисунок 3.4 - $\lambda=1 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$, при нагреве от 680°C до 830°C

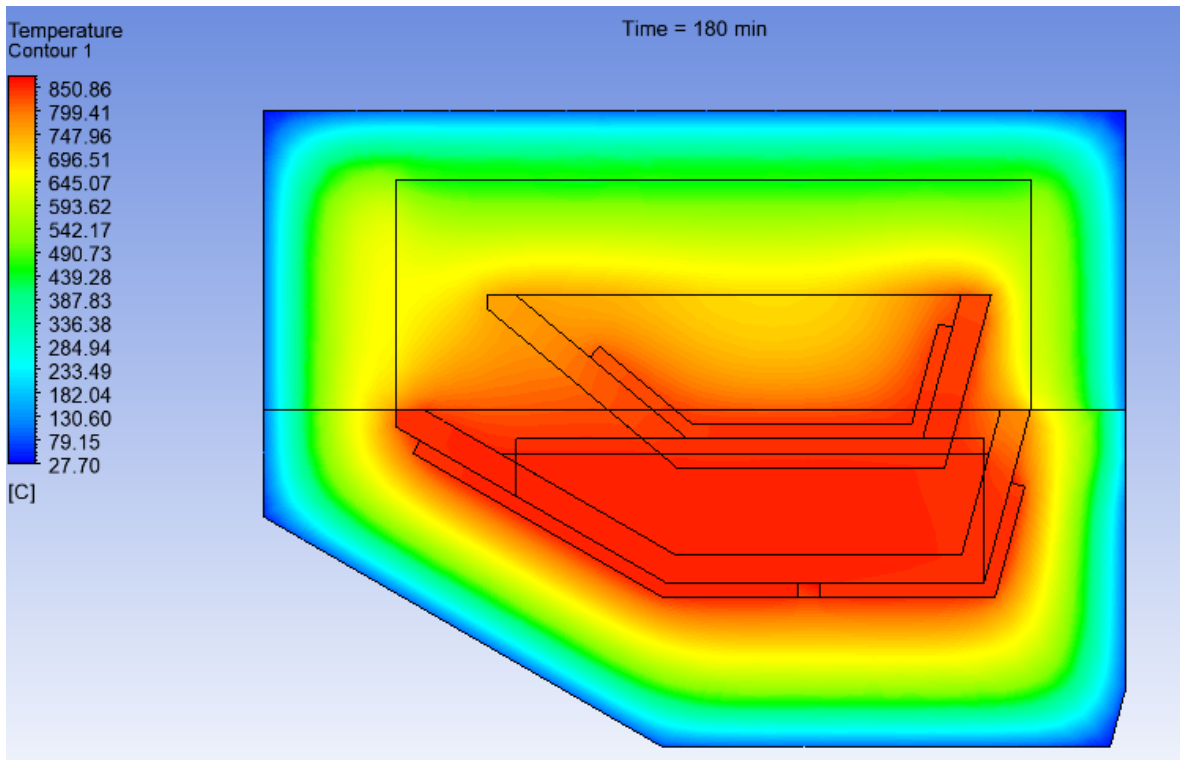


Рисунок 3.5 - $\lambda=5 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$, при нагреве от 680°C до 830°C

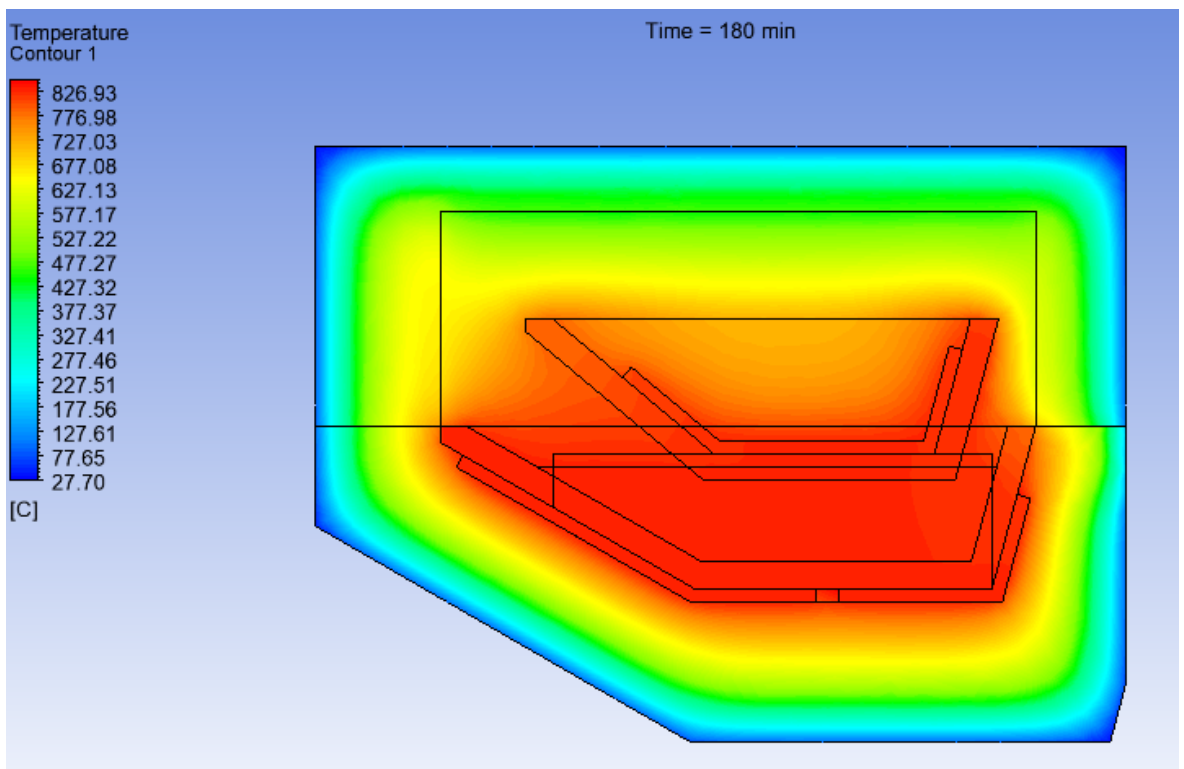


Рисунок 3.6 - $\lambda=15 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$, при нагреве от 680°C до 830°C

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения выпускной квалификационной работы был произведен тепловой расчет печи с дозирующим устройством. В процессе выполнения работы была разработана упрощенная расчетная модель печи для выполнения аналитического расчёта в программном пакете ANSYS. Расчет произведен в программном пакете Mathcad.

1. Был произведен расчет электрических и тепловых параметров электронагревательных ковриков (КЭН), а именно: сопротивлений, напряжений, мощностей, величин теплового потока с подвижным поршнем и без, тепловых потерь, Также произведены геометрические измерения электронагревательных ковриков (КЭН), а именно их площадей и габаритных размеров. В данных расчётах также произведен анализ электрических, тепловых и геометрических параметров в зависимости от заполнения печи металлом на 25%, 50%, 75%, 100% и по их результатам видно, что при увеличении заполняемости печи, увеличивается производительность металла за час.

2. В программном пакете ANSYS CFX была смоделирована раздаточная печь, ёмкостью 130 кг, с протекающими в ней тепловыми процессами и температурой нагрева от 20°C до 660°C и от 680°C до 830°C:

Процесс нагрева для интервала температур от 20°C до 660°C и от 680°C до 830°C зависит от коэффициента теплопроводности - чем он больше, тем время нагрева меньше.

Процесс перегрева для интервала температур от 20°C до 660°C и от 680°C до 830°C характеризуется $\Delta T, ^\circ\text{C}$ (разность температур между заданной температурой нагрева и температурой, при которой происходит отключение нагревателей) - чем больше $\Delta T, ^\circ\text{C}$, при различных коэффициентах теплопроводности, тем меньше температура перегрева металла.

Переходный процесс до установившегося режима характеризуется, как и процесс нагрева, коэффициентом теплопроводности - чем он больше, тем время переходного процесса до установившегося режима меньше.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 А.А. Авдулов, Г.П. Усынина, Н.В. Сергеев, И.С. Технология литья алюминиевых сплавов в электромагнитный кристаллизатор для производства длинномерных заготовок малого диаметра // Журнал СФУ. Техника и технология. 2017.
- 2 Свенчанский, А.Д. Электрические печи сопротивления: учеб. для вузов. В 2-х ч. Ч. 2. / А. Д. Свенчанский. – Москва: Энергия, 1975. – 384 с.
- 3 Чередниченко, В.С. Электрические печи сопротивления. Конструкция и эксплуатация электрических печей сопротивления / В.С. Чередниченко, А.С. Бородачев, В.Д. Дмитриев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 572 с.
- 4 Баке Э., Барглик Д., Якович А., Луци С., Никаноров А., Павлов Е., Павлов С., Первухин М., Тимофеев В.Тимофеев С., Хацаюк М. МГД технологии в металлургии. Интенсивный курс Спецкурс IV. СПб: СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2013. -С. 196-211.
- 5 Сокунов, Б.А. Электротермические установки: учеб. пособие для вузов / Б.А. Сокунов, Л.С.Грובה. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2004. –122 с.
- 6 Боякова Т.А. Электромагнитные индукционные насосы и дозаторы расплавов цветных металлов.: Дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук: 05.09.03 / Т.А. Боякова. – КГТУ. – Красноярск, 2003. – 159 с.
- 7 Материалы для электротермических установок: Справочное пособие / под ред. М.Б. Гутмана.- М.: Энергоатомиздат, 1987. – 296 с.
- 8 Сизов В. И. Огнеупорные массы, бетоны и изделия для футеровок агрегатовплавки алюминия / В. И. Сизов, А. М. Гороховский, Е. В.
- 9 Нагревательное оборудование: Карбидокремниевые нагревательные элементы. <http://www.rem-teh.ru/catalog/nagrevatelnye-kovriki-ken-gen/318>.
- 10 Телегин, А.С. Конструкция и расчет нагревательных устройств / А.С.Телегин, Н.С.Лебедев. 2-е изд. доп. и перераб. М.Машиностроение, 1975. - 280 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ПРИЛОЖЕНИЕ В

ПРИЛОЖЕНИЕ Г