

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники
(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»
(наименование кафедры полностью)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Режимы работы электрических источников питания, подстанций, сетей и систем
(направленность (профиль)/специализация)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему «Повышение энергоэффективности системы индукционного нагрева при производстве пластмассы»

Студент

А.С. Горин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

А.Г. Сорокин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

руководитель

Руководитель программы д.т.н., профессор В.В. Вахнина

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« » 2017 г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« » 2017 г.

Тольятти 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1 Проблема создания системы индукционного нагрева технологических комплексов для производства пластмассовых изделий методом литья.....	5
1.1 Технология изготовления изделий из пластмассы методом литья....	5
1.2 Спецификация технологии нагрева для полимерных материалов.....	14
2. Математическая модель процесса индукционного нагрева при производстве пластмасс.....	38
2.1 Математическая модель структуры назреваемых объектов.....	38
2.2 Электромагнитные процессы и их математическая модель индукционного нагрева.....	47
2.3 Окончательная модель процессов индукционного нагрева при производстве пластмасс методом литья.....	63
3. Синтез параметров индукционного нагревателя и анализ его электромагнитных и тепловых полей при производстве пластмасс методом литья.....	71
3.1 Создание алгоритма поиска параметров системы индукционного нагрева для производства пластмасс методом литья.....	71
3.2 Расчет и анализ электромагнитных полей полимерного материала...	72
3.3 Выбор оптимальной частоты источника питания.....	78
3.4 Параметры системы индукционного нагрева во время производства пластмассы методом литья.....	85
Заключение.....	89
Список использованных источников.....	91

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время пластмассовые изделия, которые производятся путем литья, находят наибольшее применение в промышленности. И больше всего в автомобильной, аэрокосмической, судоходной, электротехнической промышленности, в сельском хозяйстве и строительной отрасли. Изделия из пластмасс широко используются для производства потребительских товаров. Требования к качеству выпускаемой продукции затрудняют создание надежного и эффективного оборудования для нагрева полимерных материалов. Для повышения эффективности производства пластмассовых изделий методом литья используется индукционный нагрев. Далее необходимо провести предварительное физико-математическое моделирование, а именно, разработать математические модели электромагнитных и тепловых процессов для неоднородных сред. Это позволит нам обеспечить качественное функционирование всего технологического процесса.

В производстве пластмассовых изделий этот метод часто использует гидравлические машины для литья под давлением. Этот процесс называется литьевым формованием. Нагревание полимерного материала до фиксированной температуры является наиболее важным моментом в производстве пластмассовых изделий. На этом этапе необходимо создать температурное поле, которое равномерно распределено по всему объему материала и предотвратит перегрев, так как это приведет к потере упругих свойств и невозможности проведения литья.

Для нагрева полимерного материала в настоящее время используются трубчатые электронагреватели (TEN) и специальные электрические нагреватели типа повязки. Устойчивые нагревательные элементы очень просты в изготовлении, имеют низкую стоимость и не особенно критичны к качеству электроэнергии. Но вместе с этими преимуществами нагреватели сопротивления также имеют ряд недостатков, которые не позволяют повысить производительность производственной линии и не могут обеспечить постоянно возрастающие требования к качеству продукции. Существует, например, нагрев

с помощью сопротивления, путем прямого воздействия горячей воды или пара. Эти методы, в свою очередь, являются дорогостоящими и неэффективными из-за большой тепловой инерции процесса и трудности получения требуемого температурного диапазона при одновременном снижении энергопотребления отопительной установки.

Рассматриваемый индукционный нагреватель используется для нагрева полимера при производстве пластмассовых изделий. Этот тип отопления по сравнению с другими типами имеет ряд преимуществ: быстрый нагрев, высокая концентрация и точная локализация энергии при нагревании, обеспечивая короткий цикл, который, в свою очередь, имеет высокую производительность. В то же время улучшается использование оборудования и материалов, снижаются затраты на энергию. В силу принципа индукционного нагрева происходит выделение тепла внутри детали, и в результате этот процесс более эффективен в энергетических затратах, чем другие методы, а количество рассеиваемой энергии чрезвычайно низкое.

Чтобы обеспечить равномерный нагрев материала со всех сторон, необходимо выбрать правильную частоту нагрева металлического шнека.

1 Проблема изготовления индукционных нагревательных систем технологических комплексов для производства пластмассовых изделий методом литья

1.1 Технология изготовления изделий из пластмассы методом литья

ООО «Пластик» - это предприятие, которое занимается переработкой различных видов пластмасс, а именно, полиамидов, полиэтилена низкого и высокого давления, полиуретана, поливинилхлорида, утилизацией вторичного сырья. ООО «Пластик» – производитель современных комплектующих для автомобильной промышленности.

С помощью новейших технологий компания производит: литье под давлением и выдувные изделия с гальваническим покрытием, изделия из эластичной, полужесткой, интегральной, микропористой и термоформованной пенополиуретана, изделия из вулканов и стекловолокна, пленки из ПВХ.

Основным направлением деятельности АО «Пластик» является выпуск всех видов пластиковых компонентов для автомобилей ВАЗ, ГАЗ, УАЗ, КамАЗ. Предприятие поставляет комплектующие для ОАО «ГМ АВТОВАЗ», ОАО «ГАЗ», ОАО «УАЗ», ООО «ЛАДА ИЖЕВСК». Разработана программа подготовки более 150 компонентов для новых моделей отечественных автомобилей. С этой целью была переоборудована промышленная база основной литейной промышленности. Кроме того, компания производит продукцию для навигационной промышленности, электроэнергетических предприятий, строительства, а также товаров для дома и т.д.

Литейное производство является одним из крупнейших и старейших магазинов. Вначале выпускались товары из полиэтилена высокого и низкого давления: танки, табуреты и все виды упаковки, пользующиеся большим спросом среди населения и производителей пищевых продуктов.

Работы по изготовлению компонентов для автомобилей включают в себя 600 предметов: раму панели, раму ветрового стекла, воздуховоды, решетку

радиатора, радиоприемные панели, обивку боковых стенок, вставку приборной панели, панель приборной панели и т.д.

Постоянно закупаются инъекционные машины Toshiba (Япония) и Demag (Германия).

Отдел производства полиуретана специализируется на производстве задних и передних сидений, дверной обшивки и новых панелей приборов для автомобилей ВАЗ, ГАЗ, УАЗ.

Магазин крупногабаритных изделий ранее специализировался на производстве теплозащитных покрытий, в настоящее время выпускает бамперы для сборки автомобилей ВАЗ. На сегодняшний день освоено производство композиционных материалов для аэрокосмических предприятий.

Для производства пластмассовых изделий методом литья под давлением в основном используются гидравлические инъекционные машины, такие как KuASY. Технология производства на различных типах литьевых машин во многом схожа. Разница заключается только в температуре нагреваемого термопластичного материала. Температура нагрева некоторых полимерных материалов приведена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Данные температуры нагрева

Материал	Температура, °С
Полиэтилен низкой плотности	200
Полиэтилен высокой плотности	235
Полипропилен	245
Гибкий поливинилхлорид	230
Жесткий поливинилхлорид	175
Нейлон	285
Ацетилцеллюлоза	225

Конструкция гидравлической машины для литья под давлением KuASY показана на рисунке 1.1. Термопластичные материалы, которые можно

формовать под давлением, обрабатывают на этой гидравлической машине для литья под давлением с использованием современных методов переработки пластмасс. Установка состоит из двигателя (1), цилиндра пластификации (2), загрузочного бункера (3), резистивных нагревателей (4), пресс-формы (5) и винта (6), который расположен в цилиндре пластификации. Сырье (7) из приемного бункера (3) входит в цилиндр пластификации (2) и равномерно распределяется вдоль его длины, вращая винт (6), который приводится в действие двигателем (1). С помощью нагревателей доводится до определенной температуры и далее расплавленный материал вливается в форму штамповочного устройства (5).

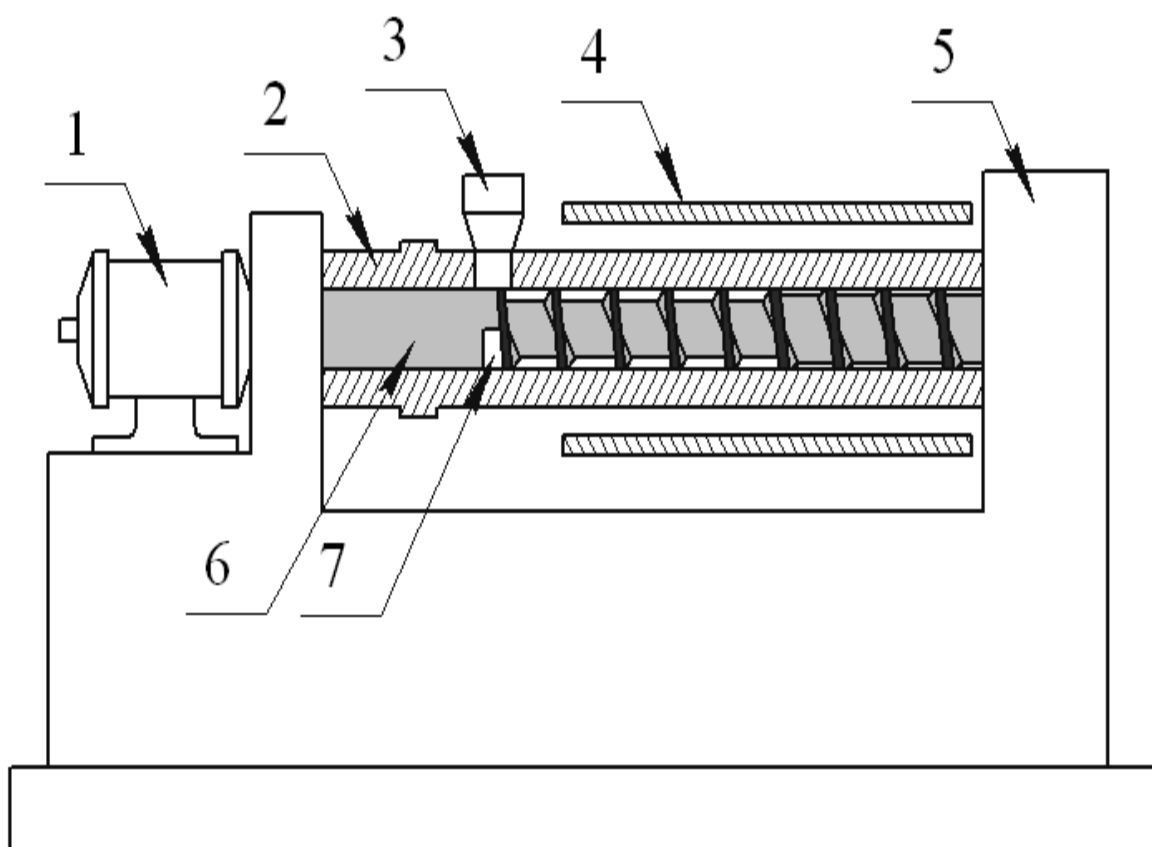


Рисунок 1.1- Конструкция гидравлической машины для литья под давлением типа KuASY

Основными элементами гидравлической машины для литья под

давлением являются пластифицирующий цилиндр (рисунок 1.2) и шнек (рисунок 1.3).



Рисунок 1.2 - Цилиндр пластикации



Рисунок 1.3 - Шнек

Основные технические характеристики гидравлической машины для литья под давлением KuASY 630/1600 представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Технические характеристики гидравлической машины

Технические данные	Размерность	Величина
Давление впрыска	кг/см ²	2020
Рабочий объем цилиндра впрыска	см ³	323
Объемная скорость впрыска	см ³ /с	208
Ход шнека	мм	165
Скорость перемещения шнека	мм/с	8,5
Число оборотов шнека	мин ⁻¹	35÷90
Производительность пластикации	кг/час	90
Ход сопла	мм	320
Радиус сферы сопла	мм	19
Диаметр отверстия сопла	мм	3÷6

Продолжение таблицы 1.2

Скорость прямого хода подвижных плит	мм/с	75
Скорость смыкания	мм/с	75
Скорость раскрытия	мм/с	80
Скорость обратного хода подвижных плит	мм/с	80
Ход подвижной плиты	мм	400
Рабочее давление	кг/см ²	140
Общая установленная мощность	кВт	44
Мощность привода шнека	кВт	7,5
Мощность привода гидронасосов	кВт	23,5
Мощность обогрева	кВт	13
Габариты: длина / ширина / высота	мм	6720/1200/2320

На структуры возлагаются следующие требования:

- предоставление определенной формы продукта;
- с учетом изменения формы потока в конфигурации слота для формирования;
- умение работать с максимальной производительностью;
- структура должна обладать необходимым сопротивлением;
- соответствующий показатель жесткости структуры профилирующих органов;
- объемный расход по необходимости должен регулироваться.

Для удаления загрязняющих веществ по каждой установке, вытяжная вентиляция является обязательной.

Расплавленный материал из сопла попадает в форму, где структура, размеры и затем охлаждение материала стабилизируются.

Цилиндры пластификации работают при повышенной температуре (до 400 ° С) и давлении (до 70 Мн / м²), износостойкости и коррозионной

стойкости [4]. За цилиндром расположены устройства для нагрева и охлаждения автономных секций цилиндра, термопар, изоляционных оболочек. В зоне подачи шнека имеется загрузочный бункер, имеющий прямоугольную, круглую или овальную форму. Также в зоне шнека находится цилиндр с рубашкой, которая предназначена охлаждать проточную воду. На переднем (обычно фланцевом) конце цилиндра закрепляется формовочное сопло. Обычно цилиндр состоит из загрузочных и рабочих деталей. Зарядная часть выполнена из стального литья с прямоугольным отверстием, смещенным от оси червя с закругленными углами. Длина отверстия в 1,2-1,5 раза больше диаметра винта с шагом в зоне подачи.

Производительность машины для литья под давлением и равномерность отливки зависят и от равномерности подачи материала в Зону загрузки и предварительное уплотнение материала. Для равномерной загрузки материала используется устройство с вертикальным или горизонтальным подающим винтом или с вибратором, но в основном загрузка выполняется вручную [4,5]. Вибрационное устройство обеспечивает наиболее равномерную подачу материала и пригодно только для загрузки гранул, поскольку оно не может обеспечить предварительное уплотнение.

Используя шнек, непластифицированный материал в форме однородного расплава из бункера равномерно подается в сопло.

В машине литьевого формования можно выделить следующие основные зоны: загрузку, сжатие и литье.

Зона загрузки выполняется с помощью большого винтового винтового канала, а также используются устройства для принудительной загрузки.

В зоне сжатия диаметр винта сужается, материал уплотняется и воздушные включения удаляются.

В зоне дозирования расплав гомогенизируется и возникает давление, при котором расплав подается через сопло. Поскольку в этой зоне установлен стационарный режим, к нему могут быть применены законы тепломассопереноса для случая нагрева вязких жидкостей под ламинарным

потоком.

Для управления машиной используются следующие режимы:

1. Настройка.

Все операции машины происходят, когда импульс включен.

Переходы выполняются на низких скоростях. Этот режим используется для установки и демонтажа пресс-формы, он не подходит для изготовления пластика. Переключатели режима работы механически взаимосвязаны.

2. Ручной режим управление.

Движения выполняются в зависимости от настроек машины. Если следовать логической последовательности управления, то литьевые изделия могут быть изготовлены индивидуально. Этот режим работы служит для подготовки машины к автоматическим режимам.

3. Полуавтоматическая.

Один цикл операции выполняется независимо.

4. Автоматический.

Один цикл операции выполняется независимо. После паузы - новый цикл.

Привод узла впрыска, оснащенный пластификатором шнека, с возможностью ступенчатого изменения числа оборотов осуществляется с помощью переключаемого редуктора с электродвигателя с переменным полюсом. Параметры блока впрыска, давления впрыска, давления удержания, сопротивления пластификации и скорости впрыска корректируются по величине. Нагрев цилиндра осуществляется с контролем температуры.

Блокировка пластификации происходит в зависимости от температуры и защищает машину от повреждений, возникающих во время холодного пуска. Режим перемещения сопла программируется. Механизм закрытия формы осуществляется по прямому гидравлическому принципу. Давление зажима и скорость перемещения подвижной пластины регулируются. Расстояние между пластинами для фиксации пресс-формы можно отрегулировать на высоту пресс-формы. Чтобы установить форму, один столбец может перемещаться. При стандартной версии машины на нем установлен механический эжектор. По

желанию заказчика устанавливается гидравлический эжектор. Система управления станком в стандартной версии позволяет работать в режиме с защитой формы от повреждений. Это заставляет подвижную пластину прыгать, чтобы выпустить эжектор и разложить расплав. Гидравлический привод включает в себя регулируемые и нерегулируемые насосы. Если вам не нужна большая мощность впрыска, тогда один комплект насосов можно отключить. Устанавливается для управления уровнем и температурой масла, а также теплообменником для поддержания постоянной температуры масла. Предусмотрена схема включения с предварительным нагревом масла.

Управляющие контакты распределяются в соответствии с конструкцией машины в соответствии с ее назначением. Низковольтная часть изготавливается контактным или бесконтактным по заказу потребителя.

Чтобы расширить возможности использования машин для литья под давлением, используйте ряд дополнительных устройств:

- устройства для обработки термореактивных материалов;
- устройства для обработки эластомеров;
- устройство для перемещения пресс-форм;
- Гидравлический эжектор;
- Подъемное устройство для установки пресс-формы.

Когда действующий персонал работает, существует опасность нанесения вреда здоровью. Тогда на литьевой машине доступны следующие предохранительные устройства:

1. Защитный забор.

Для обеспечения высоких мер безопасности электрическую и гидромеханическую блокировку запирающего движения пресс-формы применяют как две независимые друг от друга системы. Принцип работы гидромеханического ЗУ: катушка главной линии для движения закрытия формы блокируется кинематическими элементами. В заблокированном состоянии поток масла из насоса подается в слив, а маслопровод к рабочим

цилиндрам блокируется для выполнения зажимного движения. Благодаря этому обеспечивается надежная защита работников, которые обслуживают машину. Действие электрической блокировки основано на бесконтактном индуктивном бесконтактном датчике, работающем без механической связи. Когда одна из защитных ограждающих дверей открыта, оба концевых выключателя переключаются, и это вызывает активацию вспомогательного блокирующего реле в качестве контрольного и защитного действия. Этот метод обеспечивает при каждом открытии и закрытии защитного устройства автоматический мониторинг функции обоих концевых выключателей.

2. Защитный кожух сопла.

Защитный кожух пространства сопла. В открытом положении электрическая блокировка предотвращает подачу и впрыск форсунок.

3. Защитный кожух продукта вываливается.

Зона падения продуктов с обеих сторон машины закрывается складными дверями, что препятствует доступу в зону закрытия пресс-формы.

4. Аварийный выключатель на задней панели устройства.

На нижней стороне машины для литьевого формования аварийный выключатель расположен на фиксированной опорной плите формы, которая отключает привод.

Несмотря на использование защитных устройств, остаются следующие опасности:

- защитная крышка нагрева пластифицирующего устройства в рабочем состоянии нагревается до температур, которые могут вызвать ожоги при касании;
- Некоторые пластмассы склонны к разложению даже при небольшом повышении температуры;
- По мере того, как расстояние между пластинами крепления пресс-формы увеличивается, зазор между зажимным устройством и приводным блоком уменьшается, чтобы установить новую форму.

Наиболее важным моментом при определении качества готового

продукта, является нагревание полимерных масс до температур рабочего состояния. Определение температуры полимера в зависимости от параметров теплоносителя и их изменений во времени является важным элементом расчета тепловой энергии, связанного с определением рациональных режимов работы и расчетных параметров установок тепловой обработки для производства пластиковых изделий [7].

1.2 Особенности технологии нагрева для полимерных материалов

В настоящее время трубчатые электронагреватели (TEN) используются для нагрева пластика в машине для литья под давлением, а также специальные электронагреватели, обеспечивающие температуру от 100 ° С до 300 ° С на выходе. Основным элементом этих нагревателей является и хромовая катушка, которая имеет (для защиты от механических повреждений) электрическую изоляцию и защитный кожух.

Когда цилиндр нагревается до нагревателей, прикладывается полное напряжение, которое автоматически уменьшается наполовину после достижения заданной температуры, в то время как мощность нагрева уменьшается в 4 раза. Когда температура цилиндра резко понижается, нагреватели автоматически включаются при полной мощности до тех пор, пока не будет восстановлена заданная температура.

Нагреватели сопротивления просты в изготовлении, не критичны к качеству электроэнергии и имеют относительно низкую стоимость. Наряду с этими преимуществами нагреватели сопротивления имеют ряд недостатков, которые ограничивают рост производительности производственной линии и не обеспечивают постоянно возрастающих требований к качеству продукции.

Поэтому, чтобы быстро нагревать цилиндр при запуске и иметь возможность обрабатывать различные полимеры, нагреватели ставятся достаточно мощные.

Для обеспечения необходимой скорости нагрева температура нагревателя

должна быть значительно выше, чем требуемая температура рабочего цилиндра машины для литейного формования, что приводит к увеличению потерь тепла от поверхности нагревателя и, соответственно, к качественной теплоизоляции.

Сопротивление нагревателей имеет относительно короткий срок службы (400 ÷ 500 часов) из-за контакта хромовой катушки с окружающей средой, а рабочая температура спирали часто необоснованно высока (700°C ÷ 900°C), что способствует более интенсивному окислению нихрома.

Нагреватели сопротивления имеют большую инерцию из-за наличия промежуточной теплоизоляции между нагревателем и корпусом экструдера. Наличие теплоизоляции и большая постоянная времени самого нагревательного элемента затрудняют обеспечение высокой скорости автоматических систем управления [24].

Использование электрических резистивных нагревателей приводит к определенным трудностям: получение заданного температурного диапазона с уменьшением расхода энергии отопительной установки и увеличение срока службы нагревателя.

Для решения этих проблем возникла необходимость поиска альтернативного метода нагрева:

- путем прямого воздействия горячей воды или пара;
- электродуговое воздействие;
- эффект открытого пламени.

Нагрев водяным паром используется там, где он доступен в избыточных количествах. Пар имеет сравнительно низкую температуру при большом давлении, поэтому не достигается требуемая скорость нагрева для исходного материала. Например, при абсолютном давлении ($P = 0,98$ МПа) температура конденсации пара (179 °C), следовательно, диапазон его применения ограничивается температурами не выше (от 160° C до 170° C). Для нагревания до температуры 200° C необходимо подавать насыщенный пар под давлением, равным 2,5 ÷ 3 МПа. Установки с использованием пара имеют большие размеры и их трудно автоматизировать. Чтобы устранить указанные

недостатки, необходимо использовать электрическую энергию в качестве источника тепла.

Устройство нагрева и охлаждения, используемое для поддержания температуры в цилиндре машины для литьевого формования, показано на рисунке 1.4. Замкнутая система данного устройства обеспечивает нагрев и охлаждение цилиндра. В данное устройство входит напорная камера (1), которая соединена с кольцевыми каналами цилиндра (2), которые, в свою очередь, соединены продольными каналами и сверху закрыты цилиндрической оболочкой (3), на внешней поверхности которой имеется электрический нагреватель сопротивления (4). Иногда в полость цилиндра (5) устанавливается вкладыш или набор рукавов. В напорной камере имеется рубашка (6) для охлаждения проточной водой. Линия перепополнения конденсата (7) соединяет нижние полости напорной камеры и кольцевые каналы цилиндра.

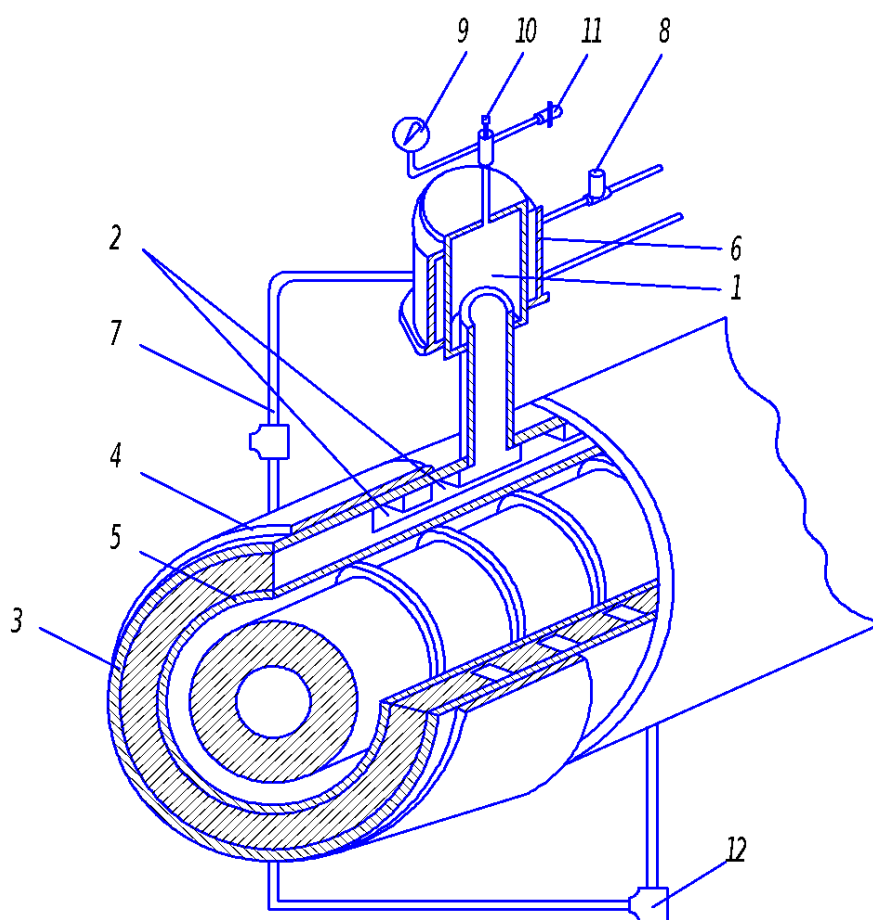


Рисунок 1.4 - Закрытая система с нагревательной средой для нагрева

и машина для литья под давлением охлаждающего цилиндра

Куртка цилиндра заполнена водой (температура до 246 ° C) или **dowtherm** (температура от 177 ° C до 371 ° C), а воздух и неконденсированные газы удаляются из закрытой системы. В результате нагрева цилиндра с электрическим нагревателем в напорной камере будет поддерживаться давление пара, соответствующее заданной рабочей температуре. Пока это давление пара поддерживается, жидкость в рубашке цилиндра не будет кипеть. Если заданная температура превышена, термopара, установленная в средней части зоны нагрева и охлаждения, посылает импульс на электромагнитный клапан (8), подключенный к линии охлаждающей воды через контакт реле терморегулятора.

Из-за охлаждения камеры пара конденсируется в нем, и начинается давление в каналах цилиндра и начинается кипение жидкости, что способствует интенсивному охлаждению цилиндра. В результате давление паров повышается, и кипение жидкости не прекращается до тех пор, пока новый сигнал термopары не откроет соленоидный клапан, и камера давления не остынет. Конденсированную жидкость возвращают из камеры давления в кольцевые каналы цилиндра вдоль линии (7) потока. Давление пара в напорной камере (1) измеряется манометром (9). При избыточном давлении открывается предохранительный клапан (10), и часть пара удаляется через сопло (11). Кран (12) установлен для запуска конденсата.

Нагревание под действием электрической дуги или открытого огня связано с определенными трудностями проектирования при построении технологической схемы производства пластмассовых изделий. Согласно опыту применения, такие технологии не полностью отвечают современным требованиям к экологическим и экономическим показателям, а также имеют низкую производительность из-за большой тепловой инерции. Кроме того, меры предосторожности не всегда выполняются.

Индукционный нагрев – это реальная альтернатива описанным выше технологиям. В настоящее время индукционный нагрев нашел широкое

применение в производстве автомобилей, строительной техники, что объясняется выделением тепловой энергии непосредственно в толщину стенки теплоаккумулирующего тела, что позволяет:

- увеличить скорость индукционного нагрева, обеспечивая более высокие удельные поверхностные мощности, в два раза в сравнении со скоростью непрямого нагрева сопротивлением;

- наносить нагревательный элемент на относительно большую секцию (самый важный нагреватель), то есть обеспечить высокую надежность систем отопления;

- гораздо проще построить систему автоматического управления технологическими процессами (APCS);

- уменьшить размеры установки и улучшить условия окружающей среды вокруг нее.

Общая эффективность (эффективность) с индукционным нагревом выше, чем при непрямом нагреве с сопротивлением, а срок службы катушек индукционного нагревателя намного выше, чем у трубчатых электронагревателей из-за их низкой температуры, что достигается охлаждением. Кроме того, при индукционном нагреве все преимущества нагрева сопротивления остаются, по сравнению с неэлектрическими типами нагрева:

- хорошие санитарно-гигиенические условия эксплуатации;
- высокая скорость и отсутствие инерции;
- отсутствие специально обученного обслуживающего персонала;
- возможность регулирования и автоматизации процесса;
- соблюдены условия для безопасности и гигиены труда.

Идея использования токов для отопительной продукции относится к начальному периоду развития электротехники. Ряд фундаментальных исследований теории вихревых токов содержится в работах, таких выдающихся ученых как Фуко, Хевисайд, Герц, Лодыгин.

Было предложено использовать индукционные токи для плавки и нагрева

металлов в различных технологических процессах. Вихревые токи создаются в проводящем теле, помещенном в магнитное поле, если по крайней мере некоторые из замкнутых контуров, которые могут быть разделены в объеме этого тела, пронизаны переменным магнитным потоком во времени.

Под действием электродинамической силы (ЭДС) возникает ток, который заставляет тело нагреваться в соответствии с законом Джоуля-Ленца.

Вихревые токи создают свои собственные магнитные поля (поля реакции), которые, образуя внешнее поле (поле возбуждения), образуют результирующее поле, изменение которого необходимо принимать во внимание. В то же время вихревые токи, взаимодействующие друг с другом и с исходным полем, создают электродинамические силы (EDU), которые при наличии соответствующих степеней свободы заставляют тела двигаться или вибрировать.

Изменение магнитного потока, проникающего в тело, возникает из-за смещения тела относительно поля возбуждения и изменения этого поля во времени с неподвижным телом. Эти механизмы генерации индуцированных вихревых токов можно назвать индукцией движения и индукцией трансформатора. Возможны оба механизма образования вихревых токов.

Например, вихревые токи из-за индукции движения возникают в электромагнитных тормозах, широко используемых в электроприводах. Известны, основываясь на этом принципе, устройства для натяжения быстро движущегося ремня. Напряжение создается за счет взаимодействия вихревых токов в поясе с их созданием, поля постоянных магнитов, расположенных над лентой. Для промышленного нагрева индукция движения практически не используется из-за необходимости высоких скоростей вращения нагретого тела или источника поля со значительным крутящим моментом и, как следствие, неравномерным нагревом. Существует опыт успешного применения индукции движения для нагрева тел простой формы, например, дисков. Стационарный диск помещается в поле постоянных магнитов или электромагнитов, приводимых в действие электродвигателем. Нет необходимости в

конденсаторном блоке и преобразователе частоты; Устройство обладает хорошей эффективностью (эффективностью).

Приборы индукционного нагрева основаны на изменении поля возбуждения во времени, они не имеют вращающихся частей и состоят из нагретого тела, которое индуцирует намотку, теплоизоляцию, магнитные цепи, структурные и дополнительные элементы, служащие для закрепления и перемещения изделия, подачи Охлаждающей воды, обеспечивают требуемое распределение температуры поля, создавая защитную атмосферу и т. Д.

Индукционные нагревательные устройства являются частью индукционного блока, который также включает в себя источник питания (промышленный частотный трансформатор, преобразователь частоты / преобразователь частоты / преобразователя / генератора энергии / тиристора), блок питания и схемы согласования (проводники, конденсаторы, согласующие трансформаторы, регуляторы), мониторинг и система контроля.

Для дальнейшего изложения целесообразно выделить концепцию электромагнитной системы, в которой электрическая энергия от силовых цепей преобразуется в энергию электромагнитного поля, а затем в тепловую энергию.

Электроиндукционный нагрев электромагнитной системы (ЭМС) представляет собой набор нагретых тел, индукционных обмоток и магнитных контуров, влияние которых определяется возникающим электромагнитным полем. Электромагнитная система (ЭМС) также может включать в себя дополнительные элементы, которые влияют на конфигурацию поля, а в некоторых случаях и сопротивление внешних цепей, если они влияют на распределение токов в индуктивных обмотках.

Классификация индукционных устройств может осуществляться в соответствии с назначением, частотным диапазоном, геометрической формой системы и режимом работы.

Наиболее сложный и трудоемкий из электротермических процессов - индукционный нагрев, который представляет собой взаимосвязанные явления различной физической природы (рисунок 1.5).

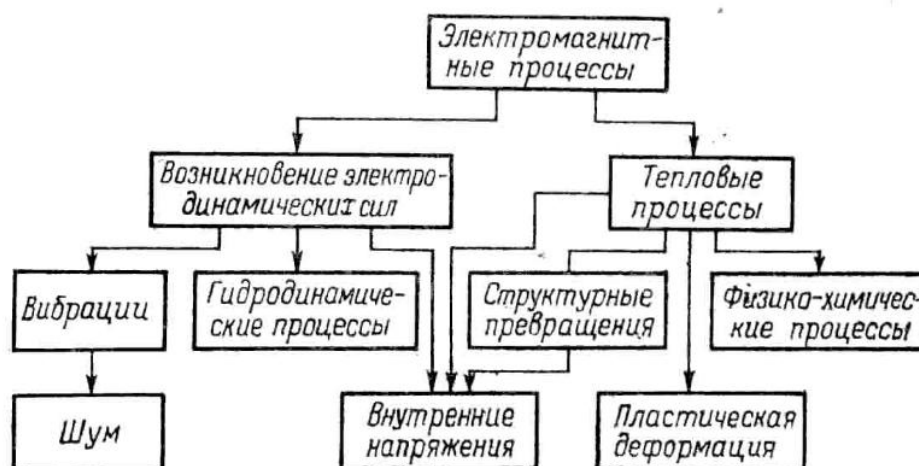


Рисунок 1.5 - Взаимосвязь физических процессов

Основные процессы - электромагнитные и термические, в то время как термические процессы включают процессы теплообмена внутри нагретого тела и внешнего теплообмена, включая теплообмен с охлаждающей средой во время термообработки. В процессе нагрева и структурных превращений возникают внутренние тепловые и структурные напряжения, что приводит к снижению прочностных свойств термически обработанных и может также вызвать трещины. При нагревании происходят либо намеренно созданные, либо сопровождающие физико-химические процессы. Первые включают в себя процессы химико-термической обработки, гомогенизации, снятия напряжения и т.д. Во-вторых, процессы роста зерна, обезуглероживания поверхности, окисления и т.д.

Электродинамические силы создают вибрации, приводящие к повреждению электрической и тепловой изоляции, нарушению целостности паяных соединений, шуму [22].

При воздействии электродинамических сил на нагреваемый материал, находящийся в жидком состоянии или в виде ионизированного газа (плазмы), появляются газо- и гидродинамические явления, которые могут существенно влиять на технологический процесс.

Пластическая деформация может возникать при индукционном нагреве, например, индукционном изгибе труб и в технологических операциях, таких как прессование, штамповка, прокат. Эффективность сильно зависит от качества нагрева, поэтому их совместное рассмотрение необходимо.

В целях оптимизации конструкций и режимов работы индукционных устройств в настоящее время ведется активная работа по совместному изучению двух или более процессов методами математического моделирования. Наиболее распространенными являются электротермические модели.

Индукционные устройства можно разделить на плавильные, нагревательные и специальные устройства [6].

Плавильные устройства имеют ряд особенностей, связанных с присутствием материала в жидкой фазе. В этих устройствах расплав движется под действием электродинамических и конвективных сил, что приводит к выравниванию температурного поля за счет теплопередачи, а также к изменениям формы расплава и других эффектов [6, 20]. Требования к расчету и проектированию плавильных устройств во многом отличаются от требований к нагревательным устройствам. Значительная часть методов электромагнитных расчетов может быть применена к устройствам плавления.

С помощью нагревательных устройств происходит прямой или косвенный нагрев материалов в твердом, жидком или газообразном состоянии.

При прямом индукционном нагреве тепло выделяется поглощением энергии электромагнитного поля нагретым (рабочим) телом. Прямые нагревательные устройства включают в себя большинство нагревателей для металлических изделий для термообработки (поверхностное и объемное упрочнение, отжиг, отпуск) и пластическую деформацию (прокатка, штамповка, прессование, вытяжка, изгиб и т. Д.). Они характеризуются передачей больших удельных мощностей, созданием требуемого, чаще всего неравномерного, температурного поля, малой тепловой инерции, можно достигать любых температур. Это основное преимущество индукционного

нагрева перед другими способами.

При косвенном нагревании в промежуточном нагревателе выделяется тепло, и он передается на нагретые тела. В устройствах с косвенным нагревом различные температуры и удельные мощности ограничены теплопередачей от промежуточного нагревателя и его теплостойкостью и, как правило, небольшими. С помощью этих устройств достигается высокая равномерность нагрева (индукционные термостаты), нагреваются непроводящие материалы, получают высокие показатели энергетической энергии (КПД и коэффициент мощности). Этот тип включает в себя большую группу устройств для нагревательного оборудования (химические реакторы, трубопроводы, экструдеры и т.д.).

Конструкция прямых и косвенных нагревательных устройств значительно различается.

При прямом нагревании материал, форма и размеры нагретых тел устанавливаются и не могут быть изменены.

При косвенном нагреве возможен выбор конструкции и материала промежуточного нагревателя, что расширяет возможности дизайна. Например, можно создать индукционные устройства с коэффициентом мощности $> 0,8$, что позволяет отказаться от компенсирующих конденсаторов.

В некоторых индукционных устройствах часть энергии выделяется в самом нагретом теле, а некоторые переносятся в виде тепла из промежуточного нагревателя, например, в печь с полупрозрачным тиглем или экраном.

Специальные устройства - устройства для сварки и пайки [6,7], индукционные плазмотроны, устройства для магнитной импульсной обработки, литья в электромагнитном кристаллизаторе и т.д. Они различаются по разнообразию параметров процесса и эффектов электромагнитного поля.

Устройства индукции частоты делятся на 3 группы:

1. Промышленные настройки частоты.

Они используются для нагрева крупногабаритных изделий для пластической деформации и термообработки, для низкотемпературного нагрева

изделий и нагрева технологического оборудования [2, 8, 14]. В последнее время стало привычным прибегать к нагреванию с пониженной частотой.

2. Настройки средней частоты (150-10 000 Гц).

Представляют основной объем индукционного оборудования и используются для нагрева пластической деформации, поверхностной и объемной термообработки, сварки, пайки и т. Д. [21].

3. Настройки радиочастоты.

Они используются для гашения небольших продуктов, сварки, пайки, создания индукционной плазмы и т. Д. Частоты составляют 66 кГц, 440 кГц, иногда 1760 кГц. Могут также использоваться двухчастотные нагревательные устройства. Частота в процессе нагрева является относительной величиной, но для каждого частотного диапазона существуют особенности конструкции и режима работы, и это необходимо учитывать при расчетах.

Форма индукционной системы определяется геометрией нагретых тел, вызывающих обмотки и их расположение относительно друг друга.

Индукционный нагрев подвергается воздействию тел различной формы, а иногда и с разной степенью электрического контакта между телами. Основные конфигурации включают плоские и цилиндрические тела, призмы и шары. Тела более сложной конфигурации могут быть заменены комбинацией вышеуказанных форм.

Для нагревания, например, для пластической деформации весь продукт или значительная его часть нагревается. Для поверхностного упрочнения чаще всего используется нагрев небольшой части тела; Местное или зональное отопление.

Чаще всего цилиндрические тела подвергаются нагреванию: твердые и полые. Нагрев цилиндров и длинных призм возможен, когда вектор напряженности магнитного поля параллелен продольной оси тела, во втором - перпендикулярно к нему. Пространственный размер электромагнитного и теплового полей для поперечного нагрева выше на единицу, чем в случае продольного нагрева, а конфигурация полей сложнее. Каждый из способов

имеет свои преимущества и недостатки. На практике также можно найти комбинации поперечного и продольного нагрева, например, в слот-индукторе [14].

Для сквозного и поверхностного нагрева наиболее часто используются индукторы (цилиндрические или овальные) с высокими энергетическими показателями: прямоугольная рама, плоскость которой параллельна нагретой поверхности. Рама, расположена перпендикулярно нагретой поверхности, плоская спираль. Плоские индукторы имеют более низкие начальные энергетические индексы (КПД и $\cos \varphi$), и они обычно должны снабжаться магнитной цепью.

Индукторы для различных технологических операций могут быть представлены как состав рассмотренных конструкций.

Рассмотрим нагрев полых цилиндров стержневым индуктором. Токпроводящий стержень вставляется в полость нагретого тела, ток через съемное соединение возвращается через шину, выложенную снаружи. Напряженный ток проходит через внутреннюю часть изделия и возвращается через внешнюю сторону. Из-за разъема такие индукторы не часто используются в устройствах прямого нагрева, но они успешно используются в варианте «все в одном» (например, для нагрева контейнеров прессов, пресс-форм и другого технологического оборудования).

Вихревые токи в нагретом корпусе всегда закрыты, поэтому нельзя равномерно разогреть стационарный индуктор с незамкнутой областью. При нагревании этой зоны необходимо обратить внимание на неизбежность ненужного, а иногда и вредного, нагрева зон замыкания вихревых токов. Полуиндукционный нагрев, при котором ток подается на продукт через контакты, этот недостаток лишен, а его путь вдоль нагретого тела образуется из-за обратного проводника, который действует как индуктивный провод. Этот метод используется только в устройствах для высокочастотной сварки и в некоторых других технологических процессах, но наличие сильноточных контактов ограничивает этот метод нагрева.

При той же конфигурации индукционной системы возможны различные варианты обмотки индуктора, которые могут быть одно- или многооборотные, а иногда и многослойные (из проводов разного сечения). Тип обмотки может существенно повлиять на методику расчета, технические и экономические параметры устройства и качество нагрева.

Иногда отдельные индукторы (или секции того же индуктора) расположены так близко друг к другу, что между ними возникает заметная магнитная связь. Такие индукторы считаются единой электромагнитной системой. Важно, в этом случае, приобретает схему для включения отдельных секций или индукторов. Например, на промышленной частоте можно создать устройство для нагрева в движущемся пульсирующем поле или с объединенным действием движущихся и пульсирующих полей [8].

Индукционные устройства в режиме работы делятся на полунепрерывные (методические), непрерывные, периодические. В полунепрерывном режиме нагретый продукт перемещается через зону нагрева - дискретно, непрерывно - непрерывно, в партии - все продукты одновременно заменяются в конце цикла. Полунепрерывные нагреватели установили циклические и различные переходные режимы. Непрерывные нагреватели различают стационарный и переходный режимы, а переходные режимы определяются пусковым методом. Из-за изменения свойств нагретого тела периодические нагреватели обычно работают в неоднократном нестационарном состоянии. Изменение режима происходит из-за изменения свойств нагретого тела и из-за его смещения в индукторе.

Характерные временные константы этих переходных режимов варьируются от одной до сотен секунд, в зависимости от типа устройства. Эти режимы не рекомендуется смешивать с чисто электрическими переходными режимами при включении или изменении напряжения питания. Электрические переходные режимы делятся на несколько (до 10) периодов напряжения питания, что составляет десятую и даже сотую доли секунды. Учет этих режимов необходим для анализа условий работы полупроводниковых приборов

и конденсаторов в силовой цепи. Эти режимы не оказывают влияния на отопление.

Чаще всего в стационарном режиме установки индукционного нагрева имеют системы автоматической стабилизации или управления режимом для любых параметров, которые обеспечивают повторяемость нагрева или изменения температуры (мощности) в соответствии с определенным законом. Отдельной задачей является обеспечение качества переходного процесса (режим запуска или перезапуска).

Для периодических нагревателей напряжение обычно стабилизируется на индукторе или источнике питания. Иногда, согласно специальной программе, используется стабилизация или регулирование мощности. Управление может выполняться как по напряжению, так и по частоте, если источником питания является генератор лампы или тиристорный преобразователь. Изменение управляющего воздействия (напряжения, частоты) во времени приводит к изменению мощности одновременно во всех частях нагревателя. Его перераспределение в пространстве (например, с изменением длины нагретого тела) может быть достигнуто посредством пространственного управления. Средствами пространственного управления могут быть короткозамкнутые кольца, автономные контролируемые секции индуктора, дополнительные магнитные цепи, подключение индуктора к источнику через схему автотрансформатора с изменением компенсирующей способности,

Необходимо обеспечить совместные требования к изменениям мощности во времени и перераспределению в пространстве (пространственно-временное управление).

Для непрерывных или прерывистых нагревателей полная мощность в установившемся режиме при фиксированном напряжении практически не изменяется или изменяется незначительно, но ее распределение по длине может различаться как из-за разницы в свойствах нагретого тела в разных частях индуктора (Естественное изменение) и в результате вынужденное перераспределение напряженности поля. Часто используются ускоренные

(высокоскоростные) режимы нагрева, которые обеспечивают быстрое увеличение температуры поверхности и ее последующее техническое обслуживание на уровне, близком к окончательному. Это может сократить время нагрева в 2-2,5 раза по сравнению с обычным нагревом.

Выбор конструкции нагревателя и установившегося режима его работы, а также определение путей и средств обеспечения оптимальных переходных режимов являются взаимосвязанными задачами проектирования. Для их реализации используются методы математического моделирования с использованием индукционных нагревателей автоматизированного проектирования (САПР).

На рисунке 1.6. представлен индукционный нагреватель для упрочнения простых цилиндрических деталей методом одновременного нагрева.

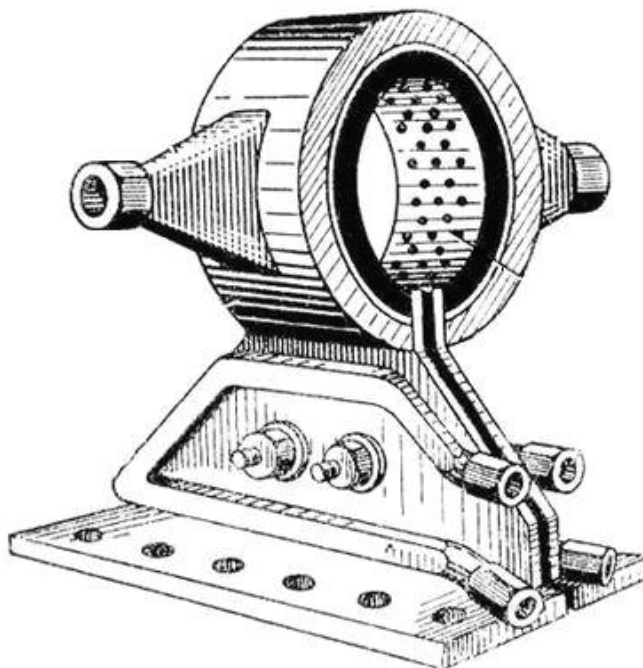


Рисунок 1.6 - Индуктор с водяным охлаждением с частотой 10 кГц

Чтобы избежать перегрева и плавления индуктивной проволоки, он выполняется массивно. Эти индукционные нагреватели питают ток на частоте 10 кГц. При изготовлении пластмасс нагрев полимерного материала осуществляется действием объемных источников тепла в цилиндре

пластификации и шнека, которые индуцируются вихревыми токами индукционного нагревателя. На рисунке 1.7 показана схема индукционного нагревателя с водяным охлаждением с частотой 50 Гц.

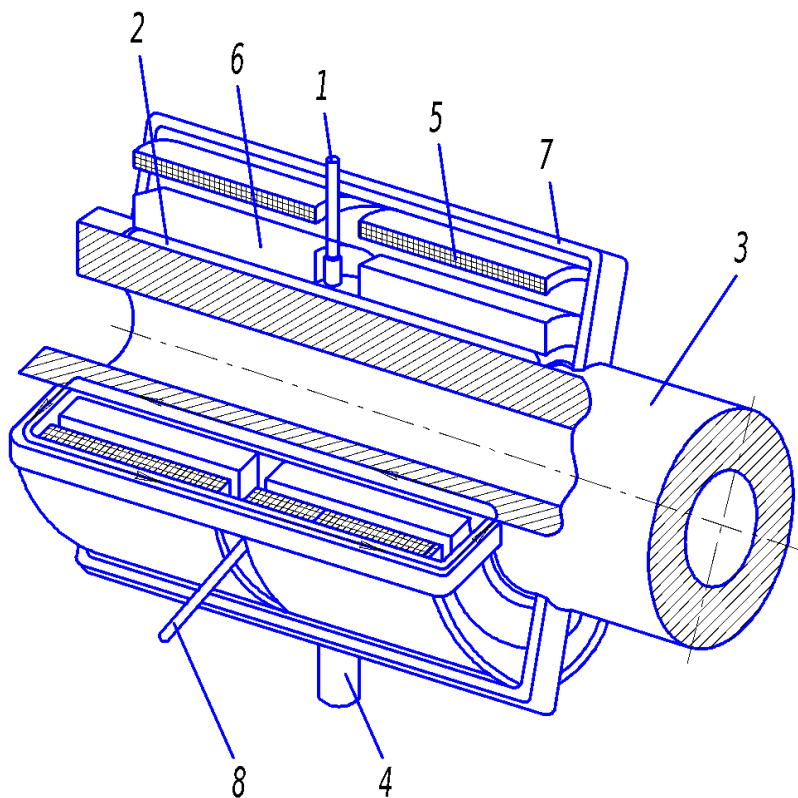


Рисунок 1.7 - Индукционный нагреватель с водяным охлаждением

Вода подается через соединение (1) в камеру (2) и смывает поверхность цилиндра (3), затем сливается через соединение (4). Индукционные нагреватели (5) установлены поверх слоя теплоизоляции (6). Фигурные пластины (7) установлены для создания замкнутых цепей электромагнитного поля и термопары (8) - для измерения температуры цилиндра.

Воздух подается через патрубок в камеру и удаляется через специальные каналы (когда цилиндр охлаждается воздухом). Индукционный нагреватель для защиты от нагрева закрыт внутри рефлектором, который отражает тепловой поток, испускаемый цилиндром. Питание подается на индукционный нагреватель через клеммную колодку.

Индукционные нагреватели работают на промышленных (50 Гц), высоких и высоких частотах. Индукционные нагреватели обеспечивают высокую надежность системы отопления, самый продолжительный срок службы (до 100 000 часов), в результате отсутствия высокотемпературного нагревательного элемента. Максимальная температура в элементах системы отопления не превышает рабочую температуру нагретого материала, также нет высокотемпературных соединений и уплотнений, а температура индуктора поддерживается системой водяного охлаждения на уровне (40 -60оС).

Производство пластмассовых изделий не требует высокотемпературного режима, как, например, при нагревании для пластической деформации. Максимальная температура нагрева (285 ° С), что значительно увеличивает срок службы индукционного нагревателя и повышает его экономическую эффективность.

Основные типичные объекты индукционного нагрева представлены в (таблице 1.3).

Таблица 1.3 – Данные типичных объектов индукционного нагрева

Вид действия	Характер процесса	Область применения
Периодический	Нагрев системы двух неоднородных цилиндров	Конверсионные технологии утилизация боеприпасов
	Нагрев ограниченных цилиндров	Изготовление колес и различных бандажей, применимых на железнодорожном транспорте
Непрерывный	Нагрев жидких и сыпучих компонентов в проходном индукторе с промежуточным	Производство пенополистирольных плит и нагрев нефти

	тепловыделяющим цилиндром	
	Непрерывный нагрев однородного цилиндра в цилиндрическом контуре	Машиностроение
	Непрерывный нагрев однородного цилиндра в щелевом контуре	Конверсионные технологии утилизация взрывателей
	Локальный нагрев крупногабаритных колец при раскатке	Изготовление колец для крупногабаритных подшипников

При индукционном нагреве общий КПД выше, чем при непрямом нагреве. Благодаря высоким техническим и энергетическим показателям использование индукционных нагревателей позволяет значительно снизить эксплуатационные расходы, обеспечивая высокую эффективность, превосходный контроль процесса, надежность, стабильность и, как результат, качество продукции увеличивается.

В последние годы все больше и больше применений было найдено для индукционных отопительных установок в нефтеперерабатывающей промышленности, в строительной отрасли, в конверсионном производстве и других отраслях промышленности. Индукционные установки, используемые в этих отраслях промышленности, имеют ряд особенностей, которые различают их в отдельном классе объектов.

Основное отличие от объектов в области обработки металлов - наличие двух физически неоднородных сред, первым из которых является металлический цилиндр, второй - диэлектрический материал. Электропроводящий цилиндр и винт представляют собой промежуточные динамические звенья, в которых тепло передается на нагретый полимерный

материал, контактирующий с ними. Передача тепла происходит через контактную поверхность конъюгатных тел, и тогда создаются условия для соединения тепловых потоков и температур на границах двух физически неоднородных сред. В этом случае тепловой контакт поверхностей тел идеален. Формирование заданного температурного поля по объему нагретого материала является целью контролируемого процесса.

Существуют различные типы нагревательных цепей, в которых продукт нагревается теплообменом с промежуточным топливным элементом, изготовленным из проводящего материала (рисунок 1.8).

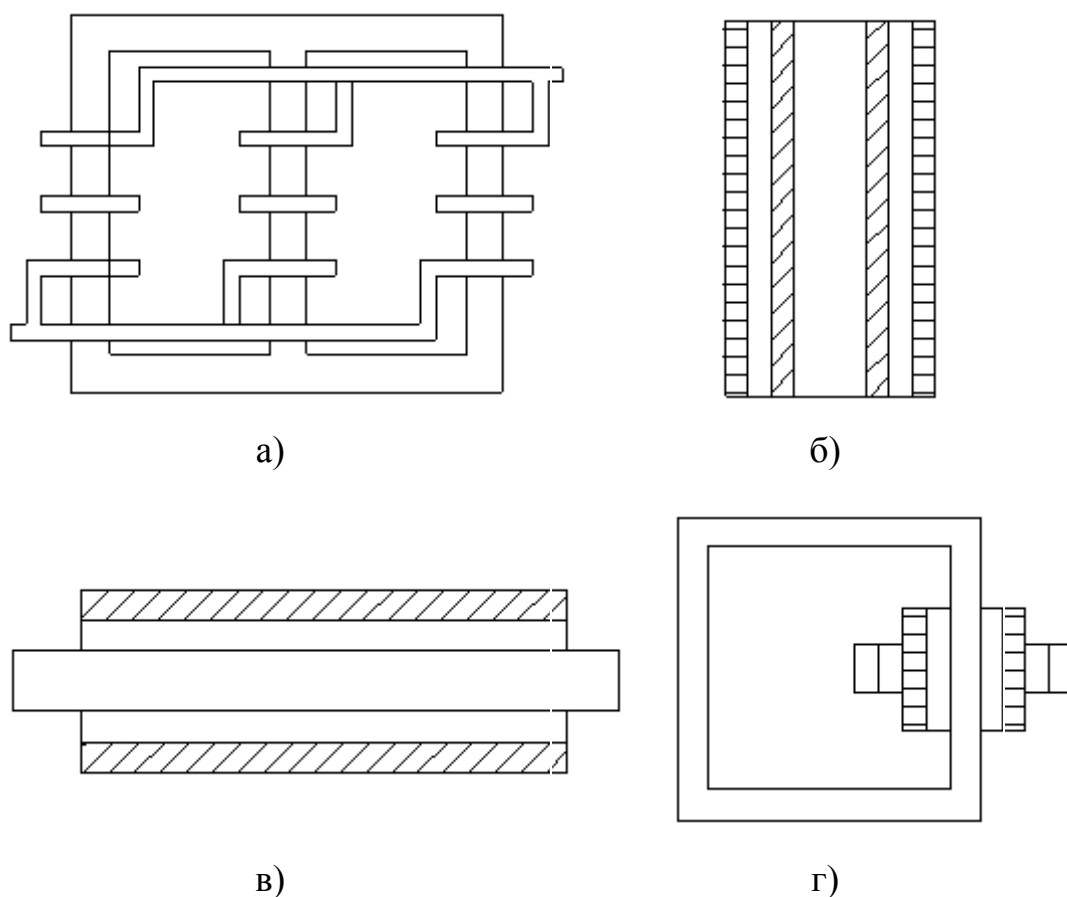


Рисунок 1.8 - Основные типы индукционных нагревателей

Схема аналогична конструкции трансформатора.

Рисунок 1.8. А - вторичная обмотка представляет собой трубку, через которую протекает нагретая жидкость;

Рисунок 1.8. В - индуктор закрывает трубу, через которую протекает нагретая жидкость;

Рисунок 1.8. С - схема комбинированного нагрева: индукционное и косвенное нагревание по сопротивлению;

Рисунок 1.8. D - индуктор расположен внутри нагретого элемента конструкции.

В нашем случае для нагрева полимерного материала мы выбираем схему, в которой индуктор закрывает материальный цилиндр. Эта схема проста в исполнении и имеет относительно небольшие размеры. Примерная диаграмма теплообменника для нагрева пластика в цилиндре показана на рисунке 1.9. Конструкция представляет собой теплообменник, в котором происходит теплообмен между цилиндром пластификации, вращающимся внутри него, шнеком и гранулами порошка. Эта конструкция обеспечит симметричный нагрев со стен и шнека и, благодаря этому, уменьшит размеры теплообменника.

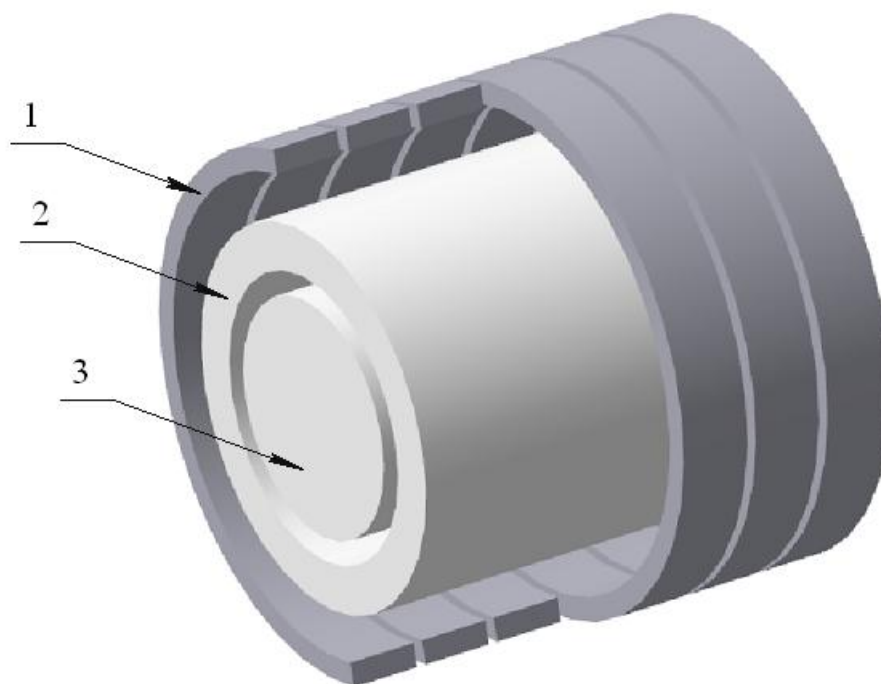


Рисунок 1.9 - Эскиз теплообменника с индукционным нагревом
1 - витки индуктивности, 2 - цилиндра пластификации, 3 - винт.

Использование индукционных нагревателей из-за их высоких энергетических и технических параметров позволяет значительно снизить эксплуатационные расходы, обеспечив высокую эффективность (эффективность), повысить надежность, стабильность и управляемость процесса, что привело к улучшению качества продукции.

Главное, что при внешнем индукционном нагреве цилиндра пластификации можно нагревать металлический винт (с удачным выбором частоты). Это обеспечивает одновременное нагревание полимерного материала с обеих сторон.

При разработке эффективной индукционной отопительной установки необходимо использовать комплексный подход, который заключается в решении задач математического моделирования и оптимального проектирования и технологического режима.

При разработке технологического комплекса, который включает индукционный нагрев в качестве неотъемлемой части технологического процесса, необходимо:

- последовательное решение задач моделирования электромагнитных и тепловых полей;
- выбор оптимального дизайна;
- анализ процесса нагрева в качестве объекта управления;
- определение вектора управляющих воздействий и синтез оптимальных систем автоматического управления с учетом ограничений, налагаемых технологическим процессом.

Используя работы Г.И. Бабата, А.М. Вайнберг, В.П. Вологодина В.В. Демидович А.Б. Донской Б.С. Немкова, Л.Р. Neumann, Н.А. Павлова А.А. Простякова, Г. Х. Родигина, А. Е. Слухоцкий, О. В. Тозони построены математические модели индукционных нагревателей.

Работы В.Б. Демидовича, М.Б. Коломейцева, Б.С. Немкова, Е.Я. Полеводова, Rapoport et a посвящены аналитическому и численному моделированию индукционного нагрева.

В работах А.И. Данилушкина, Л.С. Зимина, М.Г. Когана, А.Б. Кувалдина, А.М. Павлова, Э.Я. Рапопорта, А.Е. Слухоцкого рассмотрен расчет индукционных нагревательных установок.

М.Г. Когана, В.С. Немкова, А.Н. Павлова, А.А. Простякова, А.Е. Слухоцкого и др. впервые задался вопросом оптимизации технологии нагрева металла, и эта тема была развита в его монографиях.

В комплексах, индукционная нагревательная установка при обработке металлов давлением, а также проблема проектирования и работы систем индукционного нагрева дана в работах Л.С. Зимина.

В работах по моделированию и управлению индукционными нагревательными установками, в качестве объекта управления, рассматривается температурное поле электропроводящего металлического изделия, где джоулево тепло выделяется в результате протекания вихревых токов, индуцированных полем индуктора.

В настоящее время установки индукционного нагрева применяются в строительной индустрии, в нефтеперерабатывающем производстве, в конверсионном производстве и других отраслях промышленности.

Индукционные единицы, рассмотренные в этой статье, обладают рядом особенностей, которые различают их в отдельном классе объектов. Основное различие между этим классом объектов и объектов в технологических линиях металлов заключается в наличии по меньшей мере двух физически неоднородных сред: металлического цилиндра и диэлектрического материала. Условия теплообмена между нагретым материалом и топливным цилиндром во многом зависят от особенностей конкретного процесса и свойств нагреваемого материала (теплоемкость, теплопроводность, разность температур и т.д.).

Это обстоятельство не позволяет распространить результаты, полученные в вышеуказанных исследованиях, на аналогичные производственные ситуации. Изученный в этой работе процесс косвенного индукционного нагрева непроводящих материалов в непрерывных теплообменниках относится к классу новых нестандартных объектов, которые имеют ряд специфических

особенностей. В условиях строгих требований к точности воспроизводства температур (при наличии ограничений) достижение указанных технологических и энергетических характеристик предлагаемой установки возможно только путем изучения динамических свойств процесса методами математического моделирования и создания алгоритмов и систем автоматического управления на основе математических моделей.

Высокая эффективность установки может быть достигнута только с использованием системного подхода при настройке и решении задач оптимизации проектирования и управления режимами работы. Конструкция установок для нагревательных теплообменников подразумевает решение ряда задач, включая оптимальный дизайн системы индукции и конструкции теплообменника, а также оптимизацию технологического режима.

Оптимальный дизайн - это процесс принятия лучших (оптимальных) решений с помощью ПК. Т.е. в процессе поиска наилучшего решения необходимо выбрать единое решение из большого числа возможных решений, чтобы получить самые высокие технические и экономические показатели разрабатываемой системы (с учетом требований, предъявляемых к проекту). Свойства нагретого материала, которые по существу зависят от температуры (теплопроводность, вязкость, удельная плотность, энтальпия), потребовали разработки оптимальной конструкции теплообменника.

При расчете системы нагрева машины литьевого формования необходимо учитывать: температурный режим, давление в рабочей зоне, конкретный тип продукта и мощность установки. Для обеспечения хорошего качества готового продукта необходимо, чтобы получить однородную массу расплава, выбрать температурный режим, который будет способствовать оптимальному нагреву обработанного материала. Для оптимальной конструкции индукционных блоков (для нагрева теплообменников) необходимо выбрать оптимальную рабочую частоту индукционной системы, а также оптимизировать температурный режим процесса. Затем, выбирая оптимальные расчетные параметры, разработана технология производства пластмассовых изделий

путем литья с использованием индукционного нагрева.

Вывод:

- Приведены параметры и приведены краткие характеристики отдельных узлов технологической линии для производства пластмассовых изделий путем литья;
- Рассматриваются особенности нагрева непроводящих полимерных материалов в литьевой машине;
- Анализ технологии производства пластмассовых изделий методом литья. Этот анализ показал, что для достижения наилучших технических и экономических показателей необходимо использовать высокоэффективные технологии нагрева. Индукционный нагрев, исходя из существующих методов нагрева, наиболее соответствует требованиям;
- Представленный обзор работ, посвященных расчетам, проектированию и практическому применению индукционных установок в различных технологических процессах, определил, что используемые в этой работе индукционные единицы имеют ряд особенностей, которые различают их в отдельном классе объектов.

2 Математическая модель процесса индукционного нагрева при производстве пластмасс

2.1 Математическая модель структуры отопительных объектов

Чтобы получить наиболее точные значения температуры, необходимо определить процесс индукционного нагрева в теплообменнике. Эта проблема очень сложная, и это связано с неоднородностью среды, а также со сложностью дизайна.

Объектом, который мы рассматриваем, является теплообменник, состоящий из полого цилиндра пластификации и винта, который находится внутри него (рисунок 2.1). Полимер нагревается теплообменом между шнеком и стенками теплообменника, где вихревые токи индуцируются их индуктором.

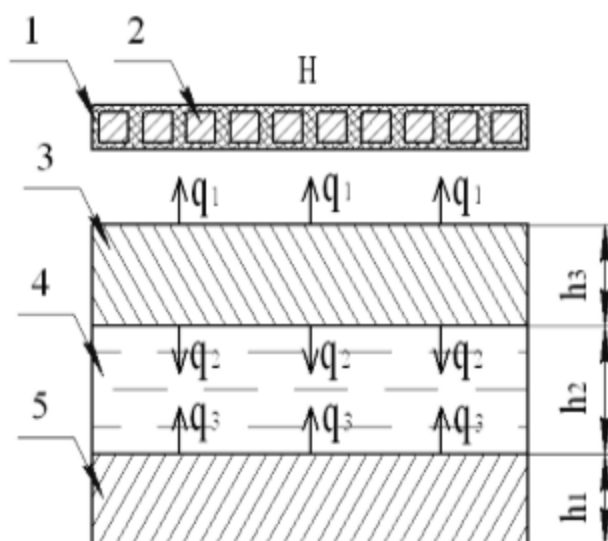


Рисунок 2.1 - Электротермическая проблема

На рисунке 2.1 обозначены:

- 1 - изоляционная изоляция,
- 2 - индуктор,
- 3 - цилиндрические стенки пластификации,

4 - полимерный,

5 – винт,

q_1 - тепловой поток от стенки цилиндра пластификации до открытого воздуха;

q_2 - тепловой поток от стенки цилиндра пластификации к полимеру;

q_3 - тепловой поток от винта к полимеру;

h_1 - радиус шнека;

h_2 - толщина полимерного слоя;

h_3 - толщина стенки цилиндра;

L - длина секции и индуктивности, которые нагреваются.

Первоначально полимер поступает в зону подачи из бункера, который представляет собой смеситель в виде сырья из гранул. Затем материал входит в зону сжатия.

В соответствии с конструкцией устройства материал начинает плавиться в точке, где полимер контактирует с поверхностью цилиндра и винта и собирает температуру, равную температуре плавления полимера. Когда толщина пленки, которая образуется во время плавления, увеличивается и превышает толщину зазора между разрезом винта и цилиндром, передняя стенка винтового канала начнет удалять избыток расплавленной пленки. В результате остатки расплава будут накапливаться на стенке толкателя, а ширина пули гранул будет уменьшаться.

Когда ширина пробок уменьшается до нуля, процесс плавления завершается. Как правило, точка плавления слегка сдвигается в направлении выхода полимера относительно точки цилиндра, которая имеет температуру, приблизительно равную температуре плавления, хотя процесс плавления гранул начинается в точке соприкосновения с внутренней стенкой тело.

Первоначальный расплав частично заполняет поры между гранулами, что является следствием увеличения толщины расплавленной пленки.

Когда толщина этой пленки будет больше, чем величина радиального

зазора, тогда расплав начнет накапливаться на толкающей стенке винтовой резки.

Поэтому было бы разумно ввести такое определение, как - зона задержки плавления. Это место, которое начинается в точке, где поверхность полимерной пробки достигает точки плавления и заканчивается на участке цилиндра, где пленка расплава многократно увеличивается по толщине зазора.

В общем, расплав твердых частиц осуществляется теплом, который переносится через расплавленную пленку. Следовательно, сопротивление теплопередаче концентрируется на поверхности цилиндра в тонкой пленке.

Термопластичные частицы, которые контактируют с поверхностью винта и цилиндра, нагреваются больше, чем частицы, наиболее удаленные от этой поверхности. В этих местах, расположенных дальше от поверхности, скорость сдвига и поглощение энергии материала намного больше. Механические и термические реакции материала изменяются от его местоположения по длине шнека.

Для создания установки индукционного нагрева при изготовлении пластмассовых изделий, которые в наибольшей степени удовлетворяют требованиям, необходимо создать математическую модель тепловых и электромагнитных полей. И, исходя из этой математической модели, сделайте анализ процесса теплообмена в системе «индуктор - металл - полимерный материал».

В общем, эффект в установках индукционного нагрева осуществляется путем распределения по всему объему внутренних источников тепла нагретого изделия, вызванного электромагнитным полем индуктора. Характер распределения вихревых токов зависит от теплофизических и электрофизических свойств материала, температуры нагрева и частоты источника энергии. При нагревании немагнитных материалов удельное сопротивление изменяется значительно. При нагревании ферромагнитных материалов магнитная проницаемость металла в результате существенно меняет свою глубину проникновения. Даже те тела, которые имеют

правильную цилиндрическую форму, имеют краевые эффекты в распределении магнитного поля, это также влияет на распределение источников тепла внутри них. Поэтому нам для того, чтобы провести анализ динамических свойств объекта управления, а также анализ синтеза высокоточных систем контроля температуры необходимо определять зависимость распределения внутренних источников тепла в металле в процессе нагрева.

Решение электромагнитной и тепловой проблемы необходимо для полной картины изменения характера распределения мощности и плотности тока при нагревании в цилиндре пластификации и шнека, а также для составления аналитического описания. Функции распределения внутренних источников тепла. Из-за различной инертности процессов необходимо будет отделить расчеты теплового и электромагнитного полей во времени. Поэтому мы формулируем электромагнитную задачу как квазистационарную, а проблема теплоты будет иметь производную первого порядка в дифференциальном уравнении. Это позволит нам создать процедуры расчета тепловых и электромагнитных полей, которые будут частично или полностью независимыми.

Электротермические модели - это модели, учитывающие взаимное влияние температуры и электромагнитных полей при нагревании. Используя эти модели, можно получить подробное описание потребления энергии индукционным устройством от внешнего источника питания и высвобождения энергии во время загрузки.

Б.К.Немков, П.С. Полеведов А.С. в 1970-е годы были разработаны первые электротермические модели индукционных нагревателей, построенные путем двойного дифференцирования температурного и электромагнитного полей.

Зависимость магнитной проницаемости и удельного сопротивления от температуры объясняется связью между полем температуры и электромагнитным полем.

Имея начальное распределение температуры, система расчета электротермических процессов выглядит следующим образом:

1. Зная температурное поле загрузки, находим магнитную проницаемость и удельное сопротивление всех элементов дискретизации загрузки.
2. Делаем расчет электромагнитного поля.
3. Создаем данные по источникам тепла в интерполяционном блоке. При этом данные по источникам тепла должны совпадать.
4. Находим распределение температур с временным шагом t .
5. В результате получаем следующее - если критерий окончания процесса нагрева не удовлетворяют результату, то снова возвращаемся к пункту 1.

Временной шаг t назначается в зависимости от требуемой точности вычисления. Если фиксируется момент времени t , то распределение температур на поверхности тела выбирается в зависимости от свойств схемы решения и от того, насколько сильно внутренние источники тепла изменяются в течение заданного времени t .

Если внутренние источники тепла практически не меняются, то выбор временного шага определяется только первым фактором.

Используя методы математического моделирования, можно решить огромный спектр задач теории индукционного нагрева. Преимущества этого метода математического моделирования особенно очевидны при решении задач оптимизации режимов работы устройств и конструкций индукционного нагрева.

Основными мерами оптимизации являются качество формирования температурного поля загрузки, стоимость электроэнергии и производительности. Во время оптимизации режимов работы нагревательного устройства и его конструкции, представленного на рисунке 2.1, необходимо отметить некоторые параметры, которые существенно влияют на качество:

- распределение пространства, которое определяется формой заготовки;
- частота тока питания;
- напряжение, которое подается на индуктор;
- затраты на электроэнергию.

Учитывая серьезные ограничения, которые аналитические методы имеют

в области применения и обычно используются для простых геометрических систем (или частей сложной системы), для успешного решения этой проблемы нам необходимо разработать численные методы, реализовать их качественно в программном обеспечении, обеспечить Интерактивная связь пользователя с ПК. Этот метод исследований с широким применением цифровых математических моделей и ПК называется вычислительным экспериментом.

Качество и объем информации - основное различие между вычислительным экспериментом и естественным. Объем, который мы получаем в вычислительном эксперименте, не ограничен количеством датчиков и скоростью их работы. Вычислительные эксперименты проводятся в довольно широком диапазоне проектных параметров и режимов работы устройств, в том числе аварийных. Вы можете просмотреть всю возможную номенклатуру, изменив размер и физические свойства материала. Одной из наиболее важных особенностей вычислительного эксперимента является возможность повторения результатов и отсутствие случайных ошибок, которые могут быть связаны с действиями факторов, и не были учтены.

Имеются также численные методы. Наиболее широко использовался метод конечных разностей. Этот метод имеет несколько преимуществ: трехдиагональный характер матрицы жесткости, небольшой объем памяти (когда эта процедура используется для матриц магнитных лент), мгновенное время счета и достаточно высокая стабильность всего вычислительного процесса. Но этот метод не позволяет нам описать объект сложной формы.

Метод граничных элементов сочетает достоинства численных и аналитических методов, позволяет легко описать объект любой формы, точно описывает распределение температуры с относительно небольшим набором элементов и, по сравнению с методом конечных разностей, имеет Свойство высокой стабильности из-за малой ширины полосы матрицы жесткости. Метод конечных элементов, в отличие от метода граничных элементов, из-за большего числа элементов, позволяет решать нелинейную задачу для тел более сложной формы. Для ленточных матриц, чтобы уменьшить объем памяти, вам

необходимо применить специальные процедуры. Недостаток этого метода связан с уменьшением устойчивости вычислительного процесса, из-за этого необходимо сократить временной шаг.

Чаще всего предпочтение отдается методу конечных элементов, поскольку этот метод практически не имеет ограничений на его возможности. Этот метод учитывает все существующие нелинейности при анализе полевых задач и имеет универсальную форму для построения алгоритма расчета, описывает сложные геометрические объекты.

Одним из наиболее сложных, как объект управления, является проблема идентификации процесса индукционного нагрева для получения информации о температуре в данных зонах нагретой асимметричной части с резко изменяющимся радиусом вращения (например, плавкие предохранители, трубы, концы, шеи журналов).

Требования к индукционным нагревателям, которые определяются сложностью формы:

- высокая эффективность,
- интенсивность процесса нагрева,
- высокая эффективность,
- малый вес,
- размеры.

Развитие индукционных нагревателей, которые удовлетворяли бы требованиям, невозможно без предварительных исследований на основе математических моделей, которые полностью и точно отражают процесс индукционного нагрева. С помощью метода математического моделирования решаются задачи теории индукционного нагрева. При решении задач оптимизации конструкции и режима работы индукционного нагревательного устройства (UIN) наиболее ярко проявляются преимущества метода математического моделирования [3].

Критерии оптимизации могут быть индикаторами качества для формирования температурного поля нагрузки, потребления энергии,

производительности и т. д. При оптимизации дизайна и режимов работы устройств индукционного нагрева исследуемого объекта (рисунок 2.1) наиболее важно определить параметры, которые существенно влияют на функцию качества:

- частоту тока питания,
- пространственное распределение из-за формы заготовки,
- напряжение, прикладываемое к индуктору, и другие.

Для лучшего решения проблемы создавались единые численные методы, качество их реализации в программном обеспечении, предоставляя диалог пользователя для связи с персональным компьютером, поскольку аналитические инструменты имеют жесткие ограничения в области применения и обычно используются для геометрически простых систем или частей сложной системы, обычно в линейной настройке. Эта исследовательская технология с широким использованием цифровых моделей и компьютерных вычислений называется экспериментом [27].

Вычислительный эксперимент отличается от естественного объема и качества информации. Количество датчиков и их скорость не ограничиваются объемом информации, полученной в вычислительном эксперименте. Вычислительные эксперименты используются для большого количества геометрических размеров и режимов работы устройств, в том числе аварийных. Благодаря изменению геометрических размеров, а также физических свойств материалов есть вероятность просмотреть всю возможную номенклатуру. Главная отличительная особенность вычислительного эксперимента – это периодический повтор результатов, а также возможность получения случайных отклонений из-за не учета случайных внешних и внутренних факторов.

Источники тепла – это главное управляющее действие в установках индукционного нагрева. Источники тепла индуцируются электромагнитным полем индуктора и распределяются по объему нагретого изделия.

К внутренним факторам, от которых зависит характер распределения вихревых токов и которые влияют на вычислительный эксперимент, можно

отнести тепловые и электрофизические свойства материала, температуру нагрева, частоту источника энергии и др. У немагнитных материалов при этом изменяется удельное сопротивление. Для ферромагнитных материалов происходит уменьшение или увеличение магнитной проницаемости металла, соответственно, глубины проникновения.

Чтобы составить интегральную картину изменения характера распределения тока и плотности мощности в заряде при нагреве требуется аналитическое описание функции распределения внутренних источников тепла, при этом разделение во времени процедур расчета теплового и электромагнитного полей связано с различной инерцией этих процессов.

Поэтому поставленная электромагнитная задача является квазистационарной, а тепловая задача имеет производную по времени первого порядка в дифференциальном уравнении, поэтому расчет электромагнитных и тепловых полей можно выполнять независимо друг от друга.

Математические модели, учитывающие взаимное влияние температуры и электромагнитных полей (электротермических), в процессе нагрева, дают исчерпывающую характеристику индукционного устройства с точки зрения потребления энергии от внешнего источника энергии и его изоляции в заряде.

Из числовых методов наиболее широко использовался метод конечных разностей [30]. Метод конечных разностей (МКР) по-прежнему не позволяет описывать объект сложной формы, даже с такими преимуществами, как малая емкость памяти, в случае процедур для ленточных матриц, тридиагональной природы матрицы жесткости, быстрого отсчета времени, высокой стабильностью вычислительного процесса.

Метод граничных элементов (МГЕ), сочетающий в себе преимущества аналитических и численных методов, позволяет легко описать объект любой формы и обладает высокой стабильностью из-за малой ширины полосы матрицы жесткости, более точно описывает распределение температуры с небольшим количеством элементов по сравнению с методом конечных разностей (МКР).

Метод конечных элементов (МКЭ) позволяет решать нелинейные задачи для тел сложной формы из-за большого количества элементов. Используя специальные процедуры для ленточных матриц, можно уменьшить объем памяти. Основным недостатком МКЭ является только снижение устойчивости вычислительного процесса, и в некоторых случаях это требует принятия необходимых мер, а именно сокращения временного шага.

Метод конечных элементов предоставляет большие возможности для описания сложной геометрии исследуемых объектов, при этом учитываются существующие нелинейности при анализе полевых задач и универсальность формы построения вычислительных алгоритмов. Данный метод более применим по сравнению с другими численными методами.

В ВКР для достижения целей и задач исследования используется метод конечных элементов (МКЭ), как наиболее распространенный и наиболее приемлемый для нелинейных задач с большим количеством элементов.

2.2. Электромагнитные процессы и их математическая модель индукционного нагрева

Уравнения Максвелла для квазистационарных электромагнитных полей имеют вид:

$$\operatorname{rot} \dot{H} = \dot{J} = \gamma \dot{E} \quad (2.1)$$

$$\operatorname{rot} \dot{E} = -\frac{\partial \dot{B}}{\partial t} = -\mu\mu_0 \frac{\partial \dot{H}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\operatorname{div} \dot{B} = 0 \quad (2.3)$$

$$\operatorname{div} \dot{D} = \operatorname{div} (\varepsilon \varepsilon_0 \dot{E}) = q_0 \quad (2.4)$$

где $\dot{H}, \dot{B}, \dot{E}, \dot{D}$ - векторы индукции и напряженности электрического и магнитного полей;

γ – удельная электропроводимость;

μ, ε – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости;

μ_0, ε_0 - абсолютные диэлектрическая и магнитная проницаемости;

q_0 – это плотность электрических зарядов;

\dot{J} - вектор плотности тока.

Вектор напряженности электрического поля определяется по формуле:

$$\dot{E} = \dot{E}^B + \dot{E}^П, \quad (2.5)$$

где \dot{E}^B - вихревая составляющая вектора напряженности электрического поля;

$\dot{E}^П$ - потенциальная составляющая вектора напряженности электрического поля, которая создается электрическими зарядами:

$$\operatorname{rot} \dot{E}^П = 0.$$

Исходя из математической теории для магнитного поля во всех областях, получаем

$$\dot{B} = \operatorname{rot} \dot{A}, \quad \operatorname{div} \dot{A} = 0, \quad (2.6)$$

где \dot{A} - вектор магнитного потенциала.

Из уравнения (2.5) можно выявить связь вихревой составляющей вектора напряженности электрического поля с вектором магнитного потенциала:

$$\dot{E}^B = \frac{\partial \dot{A}}{\partial t} \quad (2.7)$$

Потенциальные составляющие вектора напряженности электрического поля \dot{E}^P можно представить в виде градиента скалярного потенциала U :

$$\dot{E}^P = -gradU \quad (2.8)$$

В областях, где нет тока магнитного поля можно ввести скалярный магнитный потенциал U_M :

$$\dot{H} = -gradU_M \quad (2.9)$$

Чтобы уменьшить размер задачи или выполнить переход от векторных величин к скалярным необходимо использовать потенциалы.

Источники (\dot{J} или $\dot{\delta}$) связаны с потенциалами и выражены следующими интегралами:

$$\dot{A} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\dot{J} \partial V}{R} \quad (2.10)$$

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \int_S \frac{\dot{\delta} \partial S}{R} \quad (2.11)$$

где R - это модуль вектора R , который соединяет точку источника с точкой наблюдения.

Так же связаны напряженности электрического и магнитного полей с источниками и выражены интегральными соотношениями:

$$\dot{H} = \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{\dot{J} R}{R^3} \partial V \quad (2.12)$$

$$\dot{E} = \dot{E}^B + \dot{E}^N = -\frac{\mu\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{d\dot{J}}{dt} \times \frac{1}{R} dV + \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \int_S \frac{\dot{\sigma} R}{R^3} dS \quad (2.13)$$

Производить интегрирование мы будем по поверхностям и объемам всех проводников, которые несут ток и заряды.

В дифференциальной форме можно совместно решить уравнения (2.1), (2.4). Из (2.1) и (2.2) получаем:

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\gamma} \text{rot} \dot{H} \right) = -\mu\mu_0 \frac{\partial \dot{H}}{\partial t} \quad (2.15)$$

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} \dot{E} \right) = -\gamma\mu_0 \frac{\partial \dot{E}}{\partial t} \quad (2.16)$$

Данные уравнения применимы и для неоднородной среды по μ и γ . Из векторной алгебры знаем, что:

$$\text{rot rot} \dot{C} = \text{grad div} \dot{C} - \nabla^2 \dot{C} \quad (2.17)$$

где $\nabla^2 \dot{C}$ - векторный лапласиан \dot{C} .

В кусочно-однородной среде

$$\operatorname{div} \dot{H} = \frac{1}{\mu\mu_0} \operatorname{div} \dot{B} = 0,$$

отсюда

$$\nabla^2 \dot{H} - \mu\mu_0\gamma \frac{\partial \dot{H}}{\partial t} = 0 \quad (2.18)$$

Если $\operatorname{div} \dot{J} = 0$, то в проводнике с постоянной электрической проводимостью уравнение для \dot{E} будет таким же:

$$\nabla^2 \dot{E} - \mu\mu_0\gamma \frac{\partial \dot{E}}{\partial t} = 0 \quad (2.19)$$

Выше представленные уравнения относятся к параболическому типу и являются аналогами векторного уравнения теплопроводности (диффузии). В случае, когда вектор имеет только одну пространственную составляющую, то есть $\dot{A} = A_x \dot{e}_x$, то получаем скалярное уравнение для A_x , которое полностью соответствует уравнению теплопроводности в среде без внутренних источников:

$$\nabla^2 A_x - \mu\mu_0 \frac{\partial A_x}{\partial t} = 0 \quad (2.20)$$

Так как уравнения для проникновения электромагнитного поля в проводящую среду и уравнения для теплового поля равнозначны, то их можно использовать для решения одного поля применительно к другому. Все векторы поля в непроводящих областях (расслоенные магнитопроводы, воздушные

зазоры) подчиняются уравнению Лапласа:

$$\begin{aligned}\nabla^2 \dot{H} &= 0; \\ \nabla^2 \dot{E}^B &= 0; \\ \nabla^2 \dot{E}^H &= 0; \\ \nabla^2 \dot{A} &= 0\end{aligned}\tag{2.21}$$

Уравнение (2.18) возможно преобразовать, выделив в нем составляющую \dot{E}^B .

Так как $\text{rot } \dot{E}^H = 0$, то из (2.1) и (2.2) следует для проводящей среды с $\gamma = \text{const}$:

$$\nabla^2 \dot{E} - \mu\mu_0\gamma \frac{\partial \dot{E}^B}{\partial t} = \mu\mu_0\gamma \frac{\partial \dot{E}^H}{\partial t}\tag{2.22}$$

$$\nabla^2 \dot{E}^H = 0\tag{2.23}$$

Для \dot{E}^B в уравнении (2.21), член, содержащий \dot{E}^H , можно рассматривать, как стороннее воздействие и принимать $\dot{E}^H = \dot{E}^{CT}$.

\dot{E}^H в проводниках, в ряде простых систем, не зависит от \dot{E}^B и её можно считать известной величиной. Эта напряженность может быть найдена решая уравнение (2.22).

\dot{E}^H в общем случае зависит от распределения поля во всей системе и не может считаться сторонней величиной.

По длине индуктирующего провода и загрузки распределяются

напряженность $\dot{E}^{\prime\prime}$ и электрические заряды таким образом, что на их поверхностях нормальная составляющая плотности тока J_n равняется нулю. Поэтому полный ток i в любом сечении S проводника будет постоянен. Из уравнения (2.5) следует:

$$i = \int_S \gamma \dot{E} dS = \int_S \gamma \left(\dot{E}^{\prime\prime} + \dot{E}^B \right) dS = const \quad (2.24)$$

Интегрируя (2.5) L_{np} по длине токопровода обмотки, получим:

$$\int_{L_{np}} \dot{E} dL = \int_{L_{np}} \frac{\dot{J}}{\gamma} dL = \int_{L_{np}} \dot{E}^{\prime\prime} dL + \int_{L_{np}} \dot{E}^B dL = U_1 - e_1 \quad (2.25)$$

$$\dot{C} = C_m \cos(\omega t + \alpha) = C_m \operatorname{Re} \left[e^{j(\omega t + \alpha)} \right] = \operatorname{Re} \left[C_m e^{j\alpha} e^{j\omega t} \right] = \operatorname{Re} \left[\dot{C}_m e^{j\omega t} \right] \quad (2.26)$$

Заменяя (2.11), (2.15) получим:

$$\nabla^2 \dot{H}_m - j\omega\mu\mu_0\gamma \dot{H}_m = 0 \quad (2.27)$$

$$\nabla^2 \dot{E}_m^{\prime\prime} = 0; \quad \nabla^2 \dot{E}_m^B - j\omega\mu\mu_0\gamma \dot{E}_m^B = j\omega\mu\mu_0\gamma \dot{E}_m^{\prime\prime} \quad (2.28)$$

Это векторные уравнения Гельмгольца, которым соответствуют:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \dot{H}_m &= 0; \\ \nabla^2 \dot{E}_m^B &= 0; \\ \nabla^2 \dot{E}_m^{\prime\prime} &= 0 \end{aligned} \quad (2.29)$$

При соответствующих граничных условиях, решая уравнения (2.20) - (2.21), можно рассчитать все характеристики электромагнитных полей в

установившемся режиме.

Далее задается исходная функция на напряженности магнитного поля – это граничные условия 1-го рода.

Если задается производная функции по нормали к поверхности - это граничные условия 2-го рода. На осях симметрии и плоскостях соблюдаются, например, нулевые граничные условия 2-го рода.

Огромное значение имеют граничные условия 3-го рода, являющиеся комбинацией ГУ 1-го и 2-го рода. К ним мы относим граничные условия, которые связывают тангенциальные напряженности электрического и магнитного полей на поверхности:

$$\dot{E}_{mt} = \pm Z_0 \dot{H}_{mt} \quad (2.30)$$

где Z_0 - сопротивление единичного квадрата, равное $Z_0 = r_0 + jx_0$.

Z_0 определяется как величина, которая связывает поток S_{on} электромагнитной мощности сквозь единицу поверхности тела в данной точке с тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля \dot{H}_{mt} , возведенной в квадрат. В результате видим, что поток:

$$\bar{S} = \bar{S}_{on} n = \frac{1}{2} \left(\dot{E}_{mt} \times \dot{H}_{mt} \right) n \quad (2.31)$$

В данном случае сопротивление Z_0 определяется выражением:

$$Z_0 = \frac{2\bar{S}_{on}}{H_{mt}^2} = \frac{1}{H_{mt}^2} \left(\dot{E}_{mt} \times \dot{H}_{mt} \right) n \quad (2.32)$$

Если S_{on} и n имеют одинаковое направление, то $S_{on} > Q$ и в (2.23) следует

рассматривать, как граничные условия 3-го рода для магнитного потенциала \dot{A} .
Для проводника, к которому приложено стороннее напряжение, получаем:

$$\dot{E}_m = -j\omega \dot{A}_m + \dot{E}_m^{cm} \quad (2.33)$$

Для плоскопараллельного поля из (2.2) получаем:

$$\dot{H}_m = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial \dot{A}_m}{\partial n} \quad (2.34)$$

В результате равенство (2.23) приобретает вид граничных условий 3-го рода:

$$j\omega \dot{A}_m - \frac{Z_0}{\mu_0} \frac{\partial \dot{A}_m}{\partial n} = \dot{E}_m^{cm} \quad (2.35)$$

Чаще используются также условия сопряжения полей на границе двух сред, которые сводятся к равенству тангенциальных напряженностей \dot{E} и \dot{H} и нормальных индукций \dot{B} и \dot{D} по обе стороны границы, не содержащей поверхностных зарядов и токов:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{t1} &= \dot{E}_{t2}; \\ \dot{H}_{t1} &= \dot{H}_{t2}; \\ \dot{B}_{n1} &= \dot{B}_{n2}; \\ \dot{D}_{n1} &= \dot{D}_{n2} \end{aligned} \quad (2.36)$$

а еще к непрерывности скалярного U и векторного \dot{A} потенциалов поля.

Условия для $\dot{E}_n, \dot{H}_n, \dot{B}_t, \dot{D}_t$, с легкостью получаются из (2.23) при использовании зависимостей:

$$\dot{D} = \varepsilon\varepsilon_0 \dot{E}; \quad \dot{B} = \mu\mu_0 \dot{H} \quad (2.37)$$

При производстве полимерных изделий математическая модель электромагнитных процессов в устройствах индукционного нагрева может формироваться без существенных погрешностей, учитывая следующие допущения:

1. Пространственная конфигурация системы ограничивается симметричной областью (R – 0 – X), в данном случае \bar{B} (индукция) и \bar{H} (напряженность) магнитного поля имеют две составляющие (R – X), а \bar{A} (магнитный векторный потенциал), \bar{J} (плотность тока сторонних источников) и \bar{E} (напряженность электрического поля) направляются строго по касательным к окружностям, которые центрированы на оси индукционной системы.

2. Поле принимается квазистационарным. Это означает, электромагнитная волна запаздывает в воздухе. Это явление не характерно для металла. Данное допущение разрешает пренебрегать токами смещения по сравнению с токами в проводниках.

3. Потери на гистерезис, в результате того, что они не велики по сравнению с потерями от вихревых токов, можно не учитывать.

В двумерной области $V(r,x)$ выражается начальная постановка нелинейной электромагнитной задачи:

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu_a} \operatorname{rot} \dot{A}\right) + \gamma \frac{\partial \dot{H}}{\partial t} = \dot{J}_0;$$

$$\operatorname{rot} \dot{A} = \dot{B}; \operatorname{div} \dot{A} = 0 \quad (2.38)$$

Уравнение (2.31) для комплексной амплитуды векторного потенциала, представлено в виде:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{1}{\mu_a(r, x)} \cdot \frac{\partial \dot{A}(r, x)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{\mu_a(r, x)} \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial r \dot{A}(r, x)}{\partial r} \right] - j\omega\gamma \dot{A}(r, x) - J_0(r, x) = \quad (2.39)$$

Для определенности задачи, в качестве граничных условий, принимаем наиболее общие условия, т.е. определяем равенство нулю векторного потенциала на границе расчетной области, которая находится в бесконечности. На границе области, в реальной ситуации, магнитная энергия поля опускается до нуля. В плоскостях геометрической симметрии линии потока должны быть перпендикулярны по отношению к этим плоскостям:

$$\dot{A} \Big|_{S_1 \in S} = 0; \quad \left. \frac{\partial \dot{A}}{\partial n} \right|_{S_2 \in S} = 0 \quad (2.40)$$

Такое решение охватывает общие электромагнитные явления и дает возможность рассчитывать практически весь класс устройств индукционного нагрева, который можно описать математическим двумерным уравнением Пуассона.

Для решения задач коррекции и синтеза систем автоматического регулирования с изначально заданными параметрами температурных полей управление процессами теплопроводности необходимо создание соответствующих математических моделей, которые бы адекватно отражали физическую сущность явлений. Разработка таких моделей является достаточно сложной задачей.

За счет действия в цилиндре пластикации и шнеке объемных источников

тепла, индуцируемые за счет вихревых токов индукционного нагревателя, осуществляется нагрев полимерного материала.

Граничные условия четвертого рода используются при решении задачи теплообмена между цилиндром, шнеком и материалом.

Примем считать идеальным тепловой контакт поверхностей.

Математическая модель процесса нагрева продукта будет имеет вид:

$$\frac{\partial T_1(r, x, t)}{\partial t} = a_1 \left[\frac{\partial^2 T_1(r, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1(r, x, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1(r, x, t)}{\partial x^2} \right] + \frac{W_1(r, x, t)}{c\gamma} \quad (2.41)$$

$$r \in [r_2, r_1], x \in [0, L]$$

$$\frac{\partial T_2(r, x, t)}{\partial t} = a_2 \left[\frac{\partial^2 T_2(r, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2(r, x, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2(r, x, t)}{\partial x^2} \right] \quad (2.42)$$

$$r \in [r_3, r_2], x \in [0, L]$$

$$\frac{\partial T_3(r, x, t)}{\partial t} = a_3 \left[\frac{\partial^2 T_3(r, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_3(r, x, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_3(r, x, t)}{\partial x^2} \right] + \frac{W_3(r, x, t)}{c\gamma} \quad (2.43)$$

Граничные условия имеют вид:

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1(r, x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = \alpha_1 [T_1(r, 0, t) - T_c(r, 0, t)]$$

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1(r, x, t)}{\partial r} \right|_{r=r_1} = \alpha_1 [T_1(r_1, x, t) - T_c(r_1, x, t)]$$

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1(r, x, t)}{\partial x} \right|_{x=L} = \alpha_2 [T_1(r, L, t) - T_c(r, L, t)] \quad (2.44)$$

$$\lambda_3 \left. \frac{\partial T_3(r, x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = \alpha_3 [T_3(r, 0, t) - T_c(r, 0, t)]$$

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3(r, x, t)}{\partial x} \Big|_{r=r_3} = \alpha_3 [T_3(r_3, 0, t) - T_C(r_3, 0, t)]$$

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3(r, x, t)}{\partial x} \Big|_{x=L} = \alpha_4 [T_3(r, L, t) - T_C(r, L, t)]$$

На границе раздела двух сред, условия сопряжения температур будут иметь вид:

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(r, x, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_3} = \lambda_1 \frac{\partial T_1(r, x, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_3}; T_1(r, x, t) \Big|_{r=r_3} = T_2(r, x, t) \Big|_{r=r_3} \quad (2.45)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(r, x, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_2} = \lambda_3 \frac{\partial T_3(r, x, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_2}; T_3(r, x, t) \Big|_{r=r_2} = T_2(r, x, t) \Big|_{r=r_2} \quad (2.46)$$

Начальные условия имеют вид:

$$T_1(r, L, 0) = T_{10}(r, L); T_2(r, x, 0) \Big|_{x=0} = T_{20}(r, x); T_3(r, L, 0) = T_{30}(r, L) \quad (2.47)$$

Записываем 1-й закон термодинамики в виде дифференциальных уравнений для объемных тел и решаем тепловую задачу следующим образом:

$$\gamma c \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (v)^T (L) T \right] + (L)^T (q) = \ddot{q} \quad (2.48)$$

по закону Фурье устанавливается связь между вектором теплового потока и температурным градиентом:

$$(q) = -[D](L)T \quad (2.49)$$

Объединяем два последних уравнения:

$$\gamma c \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (v)^r (L)T \right]_+ = (L)^r ([D](L)T) + \ddot{q} \quad (2.50)$$

Общая система уравнений дополняется эмпирическими зависимостями удельной теплоемкости, коэффициентом теплопроводности, вязкости, теплопередачи и других величин от температуры.

Тепло, расходуемое на термообработку полимерного материала, главным образом определяется энергией внутренних источников тепла, индуцируемых электромагнитным полем индуктора. Чтобы оценить тепловую мощность, которая необходима для нагревания полимерного материала, следует определить теплопроводность тел цилиндра пластикации и шнека. Особое значение придается мощности внутренних источников тепла. Так как объемное тепловыделение может быть, как равномерным, так и неравномерным. Мощность определяет собой количество теплоты, выделяемое единицей объема тела в единицу времени. Основной задачей, при наличии внутренних источников теплоты, является расчет температурного поля внутри тела.

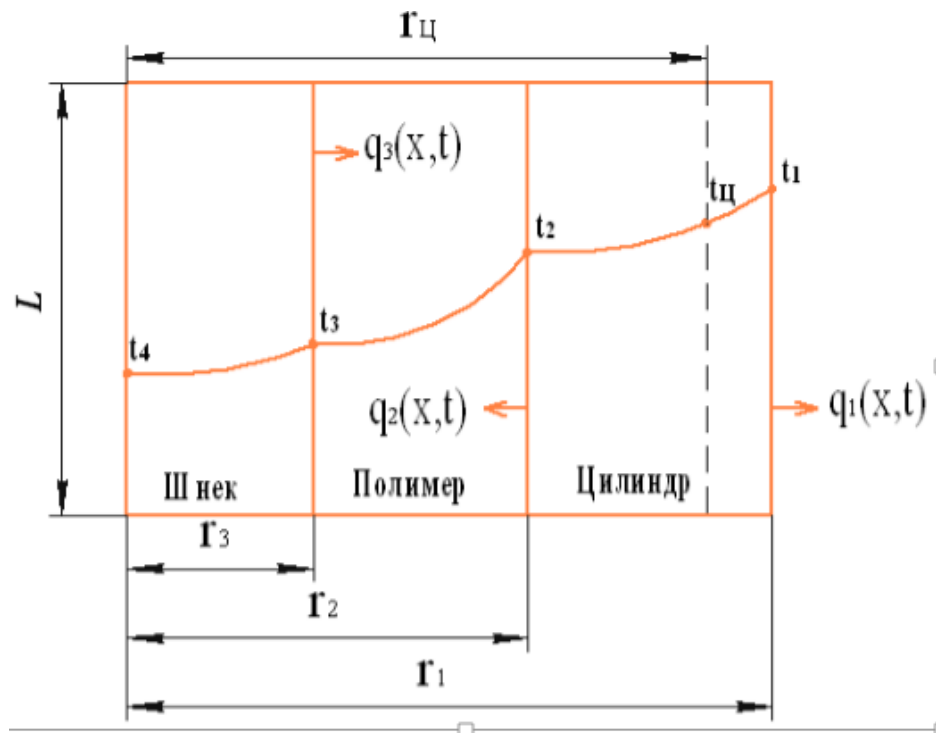


Рисунок 2.2 - Теплопроводность объекта индукционного нагрева

Объект индукционного нагрева состоит из цилиндра плаستيкации с внутренним радиусом, внешним радиусом и шнека с радиусом (соответственно r_2 , r_1 , r_3) с коэффициентом теплопроводности λ (рисунок 2.2).

Соответственно внутри каждого из них имеются равномерно распределенные источники теплоты, $q_{\text{ш}}$ и $q_{\text{ц}}$. Теплота, которая выделяется, отводится в полимерный материал.

Для шнека уравнение теплового баланса примет вид:

$$2\pi r_3 l q_3 = \pi r_3^2 l q_{\text{ш}} \quad (2.51)$$

Соответственно, в шнеке, при наличии $q_{\text{ш}}$ (внутренних источников тепла) q_3 (плотность теплового потока) изменяется пропорционально радиусу шнека:

$$q_3 = \frac{1}{2} r_3 q_{ш} \quad (2.52)$$

После разделение переменных получаем:

$$dt = -\frac{1}{2\lambda} q_{ш} r_3 dr \quad (2.53)$$

Получаем перепад температур в шнеке, интегрируя уравнение (2.3):

$$t_4 - t_3 = \frac{q_{ш} r_3^2}{4\lambda} \quad (2.54)$$

Теплота в цилиндре пластикации (радиусом r_0) отводится в основном через внутреннюю поверхность. Плотность тепловых потоков имеет вид:

$$q_1 = q_{ц} \pi (r_ц^2 - r_2^2) \quad (2.55)$$

$$q_2 = q_{ц} \pi (r_3^2 - r_ц^2) \quad (2.56)$$

Перепад температур получаем:

$$t_1 - t_2 = \frac{q_2}{4\pi\lambda} \left(\frac{2r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \ln \frac{r_2}{r_1} - 1 \right) \quad (2.57)$$

$$t_2 - t_1 = \frac{q_1}{4\pi\lambda} \left(1 - \frac{2r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \ln \frac{r_2}{r_1} \right) \quad (2.58)$$

Таблица 2.1 - Физические свойства полимерных материалов, подвергающихся переработке

Материал	t , $^{\circ}C$	ρ , $\frac{кг}{м^3}$	λ , $\frac{Вт}{м \cdot ^{\circ}C}$	$\frac{Дж}{кг \cdot ^{\circ}C}$ \tilde{n}	$\frac{м^2}{с}$ \dot{a}
Полиэтилен, обладающий низкой плотностью	195	920	0,3310	0,4300	0,3730
Полиэтилен, обладающий высокой плотностью	235	960	0,5200	0,4300	0,3730
Полипропилен	245	940	0,4600	0,4300	0,3730
Гибкий поливинилхлорид	230	1200	0,1000	0,6700	0,3980
Жесткий поливинилхлорид	175	1600	0,1000	0,9800	0,5310
Нейлон	285	1400	0,1700	0,8800	0,4950
Ацетилцеллюлоза	225	1180	0,1850	0,6000	0,3860

На основе метода конечных элементов мы вычисляем тепловые поля рассматриваемого объекта.

2.3. Окончательная модель процессов индукционного нагрева при производстве пластмасс методом литья

Идея подхода с конечными элементами заключается в изучении значимой функции процесса, а, именно, векторного потенциала, в дискретных частях анализируемой области Q , которая должна быть сначала разбита на конечные смежные субрегионы. Это сводит задачу с бесконечным числом степеней свободы к задаче, содержащей конечное число параметров. В этом случае желаемая функция внутри субдоменов интерполируется степенными полиномами, сшивается на контактных границах элементов и если геометрические размеры последних малы. Он оказывается решением уравнений

с частными производными. Автоматически сетки конечных элементов выстраиваются с использованием специальных пакетов. Они учитывают специфику задачи и предгруппируют отдельные сегменты в регионе, форма которых во всем мире отражает конфигурацию исследуемой системы (рисунок 2.3).

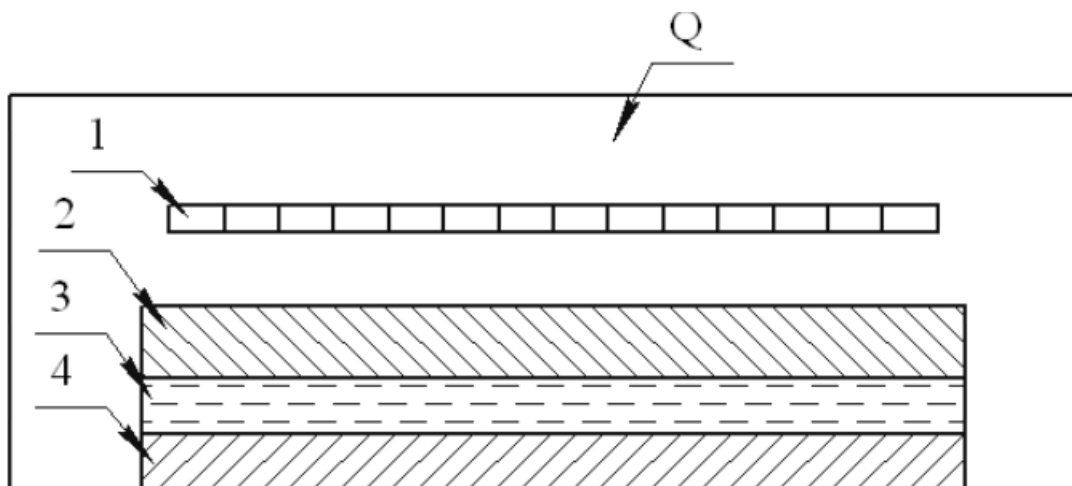


Рисунок 2.3 - Схематическое изображение системы индукционного нагрева

1 - индуктор; 2 - цилиндр пластификации; 3 - полимерный материал; 4 - шнек.

Каждому сегменту присваивается номер или имя, которое определяет его принадлежность к соответствующей конструктивной части системы индукции, а затем ввод ее данных.

В соответствии с этим методом проводится расчет индукционных систем, которые используются в качестве источников тепла в отопительных установках для вязких жидкостей в непрерывных теплообменниках.

Позже меньшие сегменты фрагментируются на элементы, определяя радиус окружностей в определенных точках, определяя плотность сетки.

Область Q покрывается сетью конечных элементов в результате разбиения. В этом случае плотность сетки возрастает в тех местах, где значительно высокие градиенты электромагнитного поля ожидаемы.

Внутри КУ, как линейные интерполирующие полиномы, мы используем линейные функции вида:

$$N_i(r, x) = (a_i + b_i r + c_i x) \times \frac{1}{2S^e} \quad (2.59)$$

В результате получаем векторный потенциал внутри треугольника.

В вершинах треугольника определяем p значениями \dot{A} :

$$A^e(\dot{r}, x) = \frac{1}{2S^e} \sum_i^k (a_i + b_i r + c_i x) \dot{A}_i \quad (2.60)$$

$a_i = r_i x_i - x_j r_k$, $b = x_j - x_k$, $c_i = r_k - r_j$ - постоянные коэффициенты функций формы N_i , которые вычисляются в зависимости от пространственных координат узлов элемента p ;

\dot{A}_i - комплексные амплитуды вектора \dot{A} в узлах КЭ.

В будущем идеология расчета основана на вариационных принципах, т. Е. Решение системы (2.38) выполняется путем уменьшения нелинейного функционала:

$$F(\dot{A}) = \frac{1}{2} \iint_{\Omega} \left[\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu_a} \cdot \frac{\partial \dot{A}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\mu_a r} \right) \frac{\partial r \dot{A}}{\partial r} \right] dr dx + \frac{1}{2} \iint_{\Omega} j \omega \gamma |\dot{A}|^2 dr dx + \frac{1}{2} \iint_{\Omega} \dot{J}_0 \dot{A} dr dx \quad (2.61)$$

Функционал (2.42) в дискретной модели определяется сложением вкладов всех СЕ, которые входят в ансамбль:

$$F(\dot{A}) = \sum_{i=1}^{ne} F_i(\dot{A}), \quad (2.62)$$

Соответственно, условие его минимума определяется по формуле:

$$\frac{\partial F}{\partial \dot{A}_i} = \sum_{i=1}^{ne} \frac{\partial F_i(\dot{A})}{\partial \dot{A}_i} = 0 \quad (2.63)$$

ne — полное число КЭ.

Если i - одна из вершин текущего треугольника, то только дифференцирование по \dot{A}_i не равен нулю.

Мы получаем, что для каждого элемента мы можем построить (2.61) блок

элементарных матриц, отражающий вклад этого СЕ в энергетический функционал (2.59):

Матрица жесткости представлена выражением:

$$k_{ij}^{(e)} = \iint_{Q^e} \frac{1}{\mu_a} \left(\frac{\partial N_i}{\partial r} \times \frac{\partial N_j}{\partial r} + \frac{\partial N_i}{\partial x} \times \frac{\partial N_j}{\partial x} \right) \cdot 2\pi r dQ^e \quad (2.64)$$

$$k_{ij}^{(e)} = \frac{\pi r^e}{2\mu_a S^e} (b_i b_j + c_i c_j); \quad i, j \in [i, j, k]. \quad (2.65)$$

Радиус центра тяжести конечного элемента:

$$r^e = (r_i + r_j + r_k)/3 \quad (2.66)$$

Матрица вихревых токов:

$$q_{ij}^e = \iint_{Q^e} j \omega \gamma N_i N_j 2\pi r dQ^e \quad (2.67)$$

Матрица внешних источников тока:

$$\dot{R}_i^e = - \iint_{Q^e} \dot{J}_0 N_i 2\pi r dQ^e; \quad R_i^e = - \frac{1}{6} \pi \dot{J}_0 S^e (2r_i + r_j + r_k) \quad (2.68)$$

Плотность внешних источников тока внутри элемента постоянна (в последнем выражении).

Ансамбль элементов – это процесс при котором элементные матрицы (2.61 ÷ 2.63), согласно выражению (2.58), объединяются в глобальные матрицы, которые характеризуют поведение всей дискретной системы:

$$[K] = \sum_1^{ne} [k]^e, \quad [Q] = \sum_1^{ne} [q]^e, \quad [R] = \sum_1^{ne} [r]^e \quad (2.69)$$

Вычисление коэффициентов элементарных матриц в реальной ситуации и их объединение выполняется одновременно. Тогда начальное уравнение в частных производных заменяем системой алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами. Соответственно, оно выражается так:

$$\langle [K] + j[Q] \rangle \times \left[\dot{A} \right] + [R] = 0 \quad (2.70)$$

Последнее решение осуществляется с помощью стандартной процедуры

LDL^T – факторизации и полностью определяет искомую функцию $\dot{A}(r, x)$ в узлах расчетной сетки конечных элементов.

Граничные условия (типа $A = 0$) учитываются, принудительно исключая столбцы и строки глобальных матриц (2.50), которые принадлежат узлам дискретной системы и расположены на удаленных границах S области Q . Условия симметрии автоматически выполняются.

Параметры магнитного поля (распределенные) вычисляются вторым выражением:

$$\begin{aligned}\dot{B}_r &= -\frac{d\dot{A}}{dx} = -\frac{1}{2S^e} \sum_i^k c_i \dot{A}_i \\ \dot{B}_x &= -\frac{1}{r} \times \frac{dr\dot{A}}{dr} = -\frac{1}{2S^e r^e} \sum_i^k (a_i + b_i r^e + c_i x^e) \dot{A}_i \\ \dot{H} &= \frac{\dot{B}}{\mu_a}; \quad x^e = \frac{1}{3} \times (x_i + x_j + x_k)\end{aligned}\tag{2.71}$$

Сила электрического поля определяется как:

$$\dot{E} = j\omega \dot{A}\tag{2.72}$$

Векторный потенциал A и напряженность электрического поля E линейно изменяются, тогда как благодаря принятой линейной интерполяции компоненты магнитной индукции внутри отдельных элементов являются постоянными.

Согласно закону Джоуля-Ленца, внутренние источники тепла рассчитываются для каждого конечного элемента, который характеризует, нагрев проводящих тел индукционной системы:

$$P_w^e = \frac{1}{2} \iiint_{V^e} \gamma \left[\dot{E} \times E^* \right] dV^e\tag{2.73}$$

Интеграция (2.54) выполняется по объему тела, который образуется, когда элемент вращается вокруг оси X .

Используя метод конечных элементов, вычисляется тепловое поле

системы. Аналитическое решение получается, если точность достаточно низка и возможны значительные упрощения. В результате, при использовании метода конечных элементов, учитываются плавающие параметры внутри элементов системы.

В процессе моделирования тепловых полей в сложной системе сопряженных тел в качестве инструмента выбирается пакет моделирования полей различной природы, который является расширением популярной вычислительной среды.

Пакет содержит инструменты для численного моделирования нестационарных физических полей, описываемых уравнениями с частными производными второго порядка. Он использует метод Галеркина (проекция) с конечными элементами.

Графический интерфейс пакета и команд может быть использован для математического моделирования физических полей в двумерных и трехмерных вычислительных областях применительно к широкому классу технических и научных приложений, включая проблемы материального сопротивления, расчеты электромагнитных устройств, Проблемы тепло- и массопереноса, и диффузии.

Пакет использует метод конечных элементов. Решение проблемы с применением FEM состоит из следующих этапов, представленных ниже:

1. Создание геометрии модели, подходящей для FEM;
2. Разделить модель на конечные элементы;
3. Применение к модели граничных условий (привязка на граничных или граничных нагрузках);
4. Численное решение системы уравнений (автоматически);
5. Анализ результатов.

Шаги 1, 2, 3 могут быть отнесены к этапу предварительной обработки, этап 4 представляет собой стадию процессора, этап 5 - этап постпроцессинга.

Построенная нами модель делится на конечные элементы довольно простой формы. Существует несколько типичных форм конечных элементов,

где поле смещения определяется из смещений узлов, используя некоторые интерполяционные функции.

Самым трудоемким шагом в решении проблем с помощью FEM является создание модели элемента на этапе подготовки препроцессора. Автоматическая конструкция сетки не гарантирует ошибок. Четвертый этап (численное решение системы уравнений) выполняется автоматически и не вызывает особых трудностей. Пятый этап (анализ результатов) облегчается доступными мощными инструментами визуализации.

Построение сетки конечных элементов на модели является одним из наиболее важных этапов анализа конечных элементов, т. Е. Разделение всей модели на мелкие кусочки (конечные элементы), соединенные вместе в узлах.

Очевидно, чем меньше линейный размер конечного элемента, тем больше количество элементов в модели. В этом случае время вычисления увеличивается, а ошибки анализа уменьшаются. Однако ошибки не сводятся к нулю, поскольку с увеличением количества элементов ошибки округления в ПК накапливаются.

Граничные условия формы Дирихле учитываются при принудительном исключении столбцов и строк глобальных матриц. Когда элементы ансамбля, условия симметрии автоматически выполняются. Параметры магнитного поля (распределенные) рассчитываются по полученному значению векторного потенциала.

Вывод:

1. В данной работе сформулирована задача построения математической модели тепловых и электромагнитных полей. Мы также рассмотрели методы математического моделирования, метод конечных элементов был выбран в качестве основного.

2. Для индукционного нагрева машины литьевого формования построена математическая модель электромагнитного поля. С помощью программного пакета вычисляется электромагнитное поле индукционного

нагревателя теплообменника. В результате мы получили диаграммы распределения мощности внутренних источников тепла по длине и радиусу нагретого тела.

3. Построена математическая модель теплового поля. Используя программный пакет, были получены тепловые поля рассматриваемого объекта.

4. Алгоритм совместного расчета электротермических полей выбирается на основе численных методов, позволяющих учитывать взаимное влияние электромагнитных и температурных полей в процессе нагрева и получить исчерпывающую характеристику.

3. Синтез параметров индукционного нагревателя и анализ его электромагнитных и тепловых полей при производстве пластмасс методом литья

3.1 Создание алгоритма поиска параметров системы индукционного нагрева для производства пластмасс методом литья

Для решения проблемы тепломассопереноса в этой формулировке был разработан вычислительный алгоритм и программа, содержащая два блока вычислений - электрические и тепловые.

Исходными данными для расчета являются:

- расчетные параметры нагревателя: длина нагревателя, геометрические размеры цилиндра и винта, электрические и тепловые характеристики цилиндра, толщина теплоизоляции, материал цилиндра;
- параметры нагретого полимерного материала: зависимость коэффициента теплопроводности, теплоемкости, вязкости от температуры, теплофизических характеристик;
- параметры мощности: частота тока, напряжение питания.

При расчете электромагнитной задачи определяются токи, интенсивность и магнитная индукция магнитного поля. Затем вычисляются функции распределения источников тепла.

В тепловом блоке определяются температуры шнека и стенок цилиндра, распределение температуры по сечению и вдоль длины потока. Исходя из результатов тепловых расчетов, уточняются теплофизические параметры. Сначала производится электричество, а затем производится тепловой расчет. Итерационный цикл выполняется до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность расчета.

Предлагаемый алгоритм совместного решения тепловых и электромагнитных задач используется для решения задач оптимизации проектных и рабочих режимов индукционных нагревателей (рисунок 3.1).

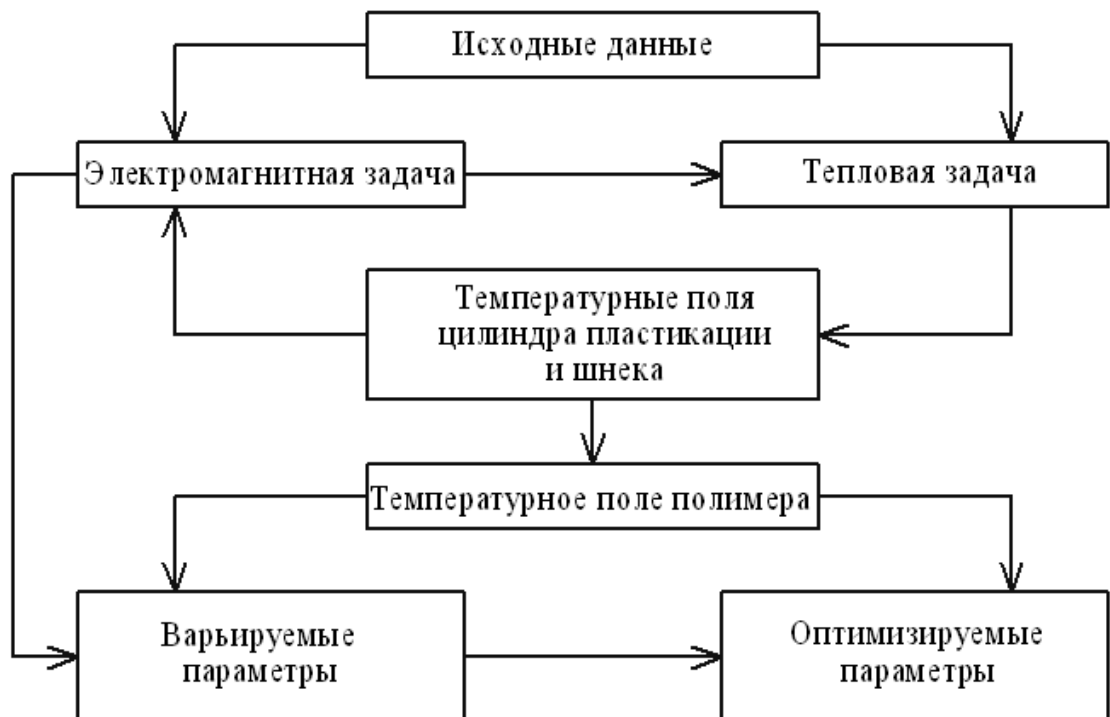


Рисунок 3.1 - Алгоритм расчета электротермического поля

Расчет индукционного нагревателя для производства пластиковых изделий основан на предлагаемых моделях [15].

Мощность нагревателя, необходимая для обеспечения процесса литья, составляет 20 кВт.

3.2. Расчет и анализ электромагнитных полей полимерного материала.

Расчет параметров индукционной системы производится путем рассмотрения тепловых, электромагнитных, электродинамических и термомеханических процессов. Некоторые из этих процессов могут быть недоступны в зависимости от типа единицы процесса. Взаимное влияние различных процессов и необходимость учета различных ограничений (например, максимально допустимых температур изоляции проводников и изогнутого железа магнитной цепи или максимальных значений тепловых

напряжений) вызывает сложную процедуру. Для поиска проектных параметров и режимов нагрева. При использовании программного управления из-за удовлетворительного качества процессов нагрева в рассматриваемых задачах алгоритм ориентирован на использование этого конкретного метода управления. Поэтому в процессе проектирования решаются задачи управления и проектирования управления, которые могут обеспечить качественное решение проблем при различных ограничениях. В некоторых случаях набор процессов достаточно велик, так что все задачи могут быть связаны в один многофазный [9].

Проблема состоит в том, что размерность вычислительной системы непропорционально возрастает до суммы систем уравнений для отдельных процессов, но намного быстрее, в результате того, что общая система создает много незаполненных элементов из-за группировки разных блоки. Одновременно для больших задач применяются косвенные методы решения. Это не позволяет сократить время вычисления и занятую память в отличие от прямых методов, где применимы экономичные методы записи многомерных разреженных массивов в виде одномерных с вычисленным индексом. Поэтому принято рассматривать некоторые процессы не с совместным решением, а после определения основных параметров.

В результате предлагаемый алгоритм включает в себя процедуры изменения параметров проекта, а также итеративный поиск времени переключения. Представленный алгоритм поиска источников и интегральных характеристик индукционной системы, а также времена переключения мощности содержат блоки, которые определяют поиск интервалов переключения и интервалов отсечки. Эти блоки включены в более высокую иерархически представленную процедуру для нахождения параметров индуктора. Параметры выбираем при сравнении функционалов, содержащих достаточно большие затраты энергии. Увеличение числа критериев в рассматриваемых проблемах может быть затруднено из-за необходимости учитывать дополнительные расчеты:

$$J = \int_0^{t_f} P dt \quad (3.1)$$

Из-за ограниченного числа вариантов проектируемой системы мы говорим только о квазиоптимальной системе индукции. И поэтому процедура оптимизации учитывает только некоторые из многих процессов.

В качестве оригинальной конструкции берется однослойная цилиндрическая катушка индуктивности, изготовленная из медной проволоки $6,3 \times 2$ с никелированной медной жилкой и двух слоев стекловолкна, пропитанных органосиликатной композицией. Рабочая температура до 600°C , общая мощность индуктора составляет 20 кВт, напряжение 220 В, число витков индуктивности - 110. Начальная конструкция показана на рис. 3.2.

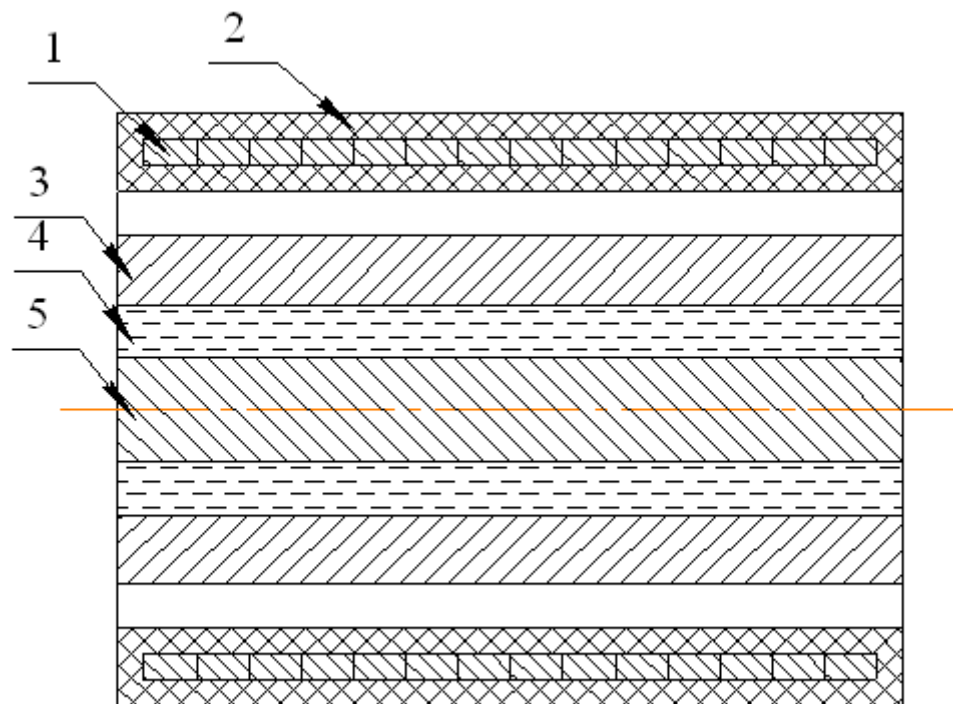


Рисунок 3.2 - Проектная схема установки индукционного нагрева

- 1 - обороты катушки индуктивности; 2 - изоляция катушек индуктивности; 3 - цилиндр пластификации;
4 - полимерный материал; 5 - шнек.

Представленная система состоит из нескольких тел, отличающихся по своим физическим свойствам, которые являются частью индукционного

нагревателя: «индуктор - теплоизоляция - цилиндр - полимерный материал - шнек».

Параметры исследуемой системы:

- Внутренний диаметр цилиндра составляет 0,046 м;
- Наружный диаметр цилиндра - 0,088 м;
- Толщина стенки цилиндра составляет 0,021 м;
- Диаметр шнека составляет 0,036 м;
- Толщина полимерного слоя составляет 0,005 м;
- мощность индукционной системы - 20 кВт;
- Количество витков в катушке индуктивности - 110;
- Питание индукторов 220 В.

Начальным моментом в развитии системы отопления является формирование данного распределения температуры. Используя программу, основанную на методе конечных элементов, строится геометрическая модель системы. В нее входят объекты, обладающие тепловым контактом. Затем устанавливаем условия для теплообмена. Сетка конечных элементов показана на рисунке 3.3. Характеристика модели FE: количество элементов - 44551, число узлов - 22419, число граничных элементов - 4652. Оперативная память, используемая для решения проблемы, равна -2 Гб.

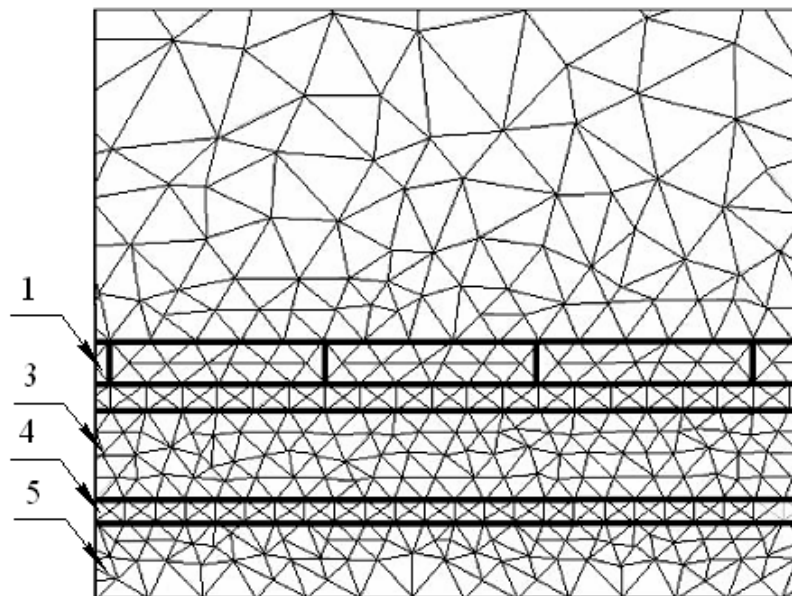


Рисунок 3.3 - Сетка конечных элементов для расчета электромагнитных полей в системе «индуктор - полый цилиндр»

Вихревые токи распределяются в зависимости от факторов, которые вызваны электрическими и тепловыми свойствами нагретого материала: температура нагрева, частота источника энергии и т. Д. Нагрев немагнитных материалов может сопровождаться значительным изменением удельное сопротивление.

На рисунке 3.4, а приведен график распределения удельной объемной мощности по длине шнека (кривая 2) и цилиндра (кривая 1). На рисунке 3.4, б показано распределение плотности тока по длине шнека (кривая 2) и цилиндра (кривая 1).

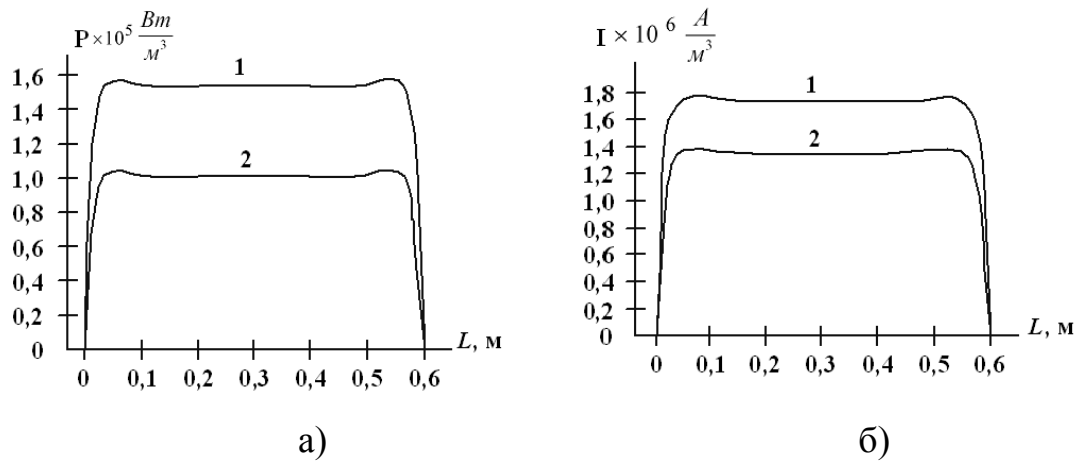


Рисунок 3.4 - График распределения вдоль цилиндра (кривая 1) и шнека (кривая 2)

На рисунке 3.5 показано распределение удельной объемной мощности и тока по поперечному сечению нагревательного объекта.

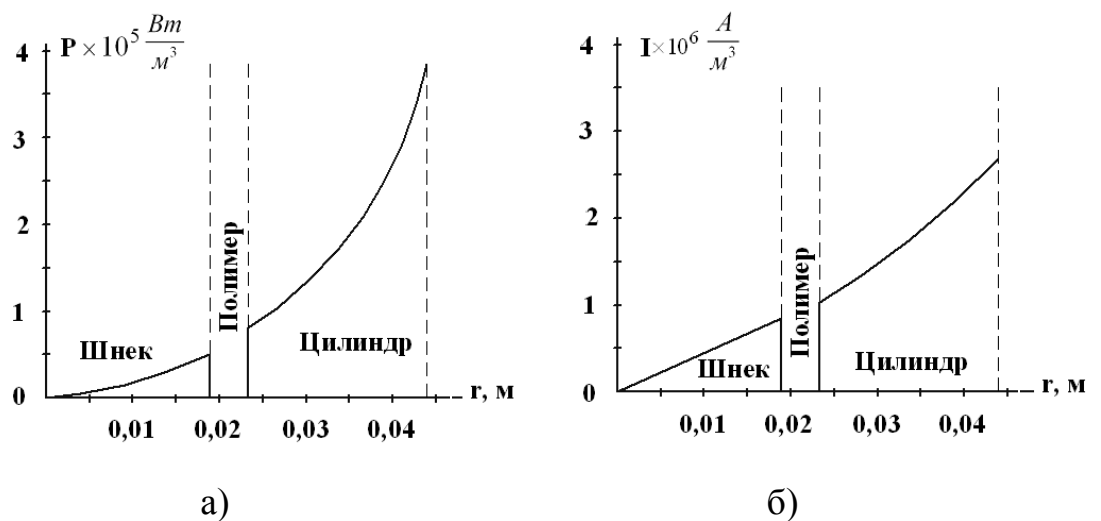


Рисунок 3.5 - Радиальное распределение нагревательного объекта

На представленных графиках видно, что, нагрев полимерного материала осуществляется от цилиндра пластикации и шнека. По данным графикам мы можем сделать вывод, что удельная объемная мощность по сечению максимальна на поверхности цилиндра и шнека и уменьшается по мере проникновения вглубь.

3.3 Выбор оптимальной частоты источника питания

Для решения проблемы создания оптимальной конструкции индукционного нагревателя, отвечающего требованиям технологии, требуется задействовать математический аппарат теории оптимального проектирования [24].

Факторы, которые могут быть представлены как объективные функции, ограничения, критерии оптимизации при выборе конкретной конструкции индукционного нагревателя, могут быть:

1. Необходимая точность распределения температуры.

Это требование является самым значительным. Он действует как параметр минимизированного функционала или является ограничением. В задачах наиболее острого нагрева, как правило, минимизируется либо абсолютное отклонение температуры, либо среднеквадратичная ошибка. При этом выбирается форма функционала. Наиболее технологичными являются проблемы оптимизации, которые используют абсолютное отклонение температуры как функциональное.

2. Обеспечение определенной мощности, скорости нагрева. 3. Энергетические показатели (полная мощность, коэффициент мощности $\cos\varphi$, электрический коэффициент полезного действия η_y).

4. Тепловые характеристики (термическая эффективность).

Экономическая эффективность системы обычно оценивается методом общей стоимости [93]. В которых учитываются:

- затраты на оборудование (трансформаторы, конденсаторы, коммутационное оборудование, регуляторы, использование стандартного оборудования);

- сохранение производственных площадей;

- удовлетворение требований безопасности, санитарных норм и экологии (электробезопасность, вредное воздействие высоких и низких частот

электромагнитного поля, загрязнение атмосферы, вибрация, шум);

- возможность внедрения гибких автоматизированных производственных мощностей, возможность автоматизации, исключение ручного труда, возможность работы в стационарных и нестационарных режимах, сокращение времени простоя;

- надежность устройства;

- минимизация затрат на техническое обслуживание, ремонтпригодность;

- использование передовых технологий (использование прогрессивного метода последовательных модулей). Необходимо определить основные факторы в каждой конкретной ситуации, которые представляют наибольший интерес с точки зрения достижения поставленной цели. В соответствии с выбранной целью рекомендуется выбирать оптимальные параметры индуктора, которые соответствовали бы соответствующим характеристикам технологического режима.

Основными параметрами (при проектировании индукционных отопительных установок), определяющими эффективность нагрева, являются характер распределения мощности и частоты тока, уровня и геометрических размеров индуктора, найденных с учетом возможных технологических ограничений. В дополнение к этому обстоятельству частота все еще определяет выбор источника питания и другого оборудования системы индукционного нагрева, то есть определяет стоимость всей установки. Поэтому, как оптимизированный параметр, сначала необходимо учитывать частоту.

Задача оптимизации будет выглядеть так: для данных электрофизических характеристик и геометрических параметров цилиндра пластификации и винта найдите частоту источника питания, которая позволит шнеку участвовать в процессе нагрева. Если разность температур ограничена 3°C .

Основным методом оптимизации параметров индукционного нагревателя является процедура определения пространства параметров проектируемой установки, в соответствии с которой выбор оптимального решения

осуществляется из набора альтернативных проектных решений, которые получены с использованием Парето Аппаратов.

В реальных ситуациях диапазон частот задается как серия дискретных интервалов или набор дискретных значений частоты. Это связано с ограниченными возможностями частотных преобразователей.

При использовании источника питания с постоянной в ходе процесса важным элементом оптимальной конструкции системы индукционного нагрева становится проблема выбора ее оптимального значения.

В качестве критериев оптимизации рассматривается электрический КПД индуктора и глубина проникновения. Частота может варьироваться от 50 до 10000 Гц. Для анализа влияния частоты на электрические параметры индуктора и выбора оптимального значения используются аналитические зависимости, приведенные в монографии [20].

Выбор частоты зависит от размера цилиндра и от электрофизических свойств материала, из которого изготовлен цилиндр. Минимальная толщина стенки определяется требованиями к механической прочности конструкции, работающей при высоких давлениях. Увеличение толщины стенки приведет к увеличению веса и размеров. В связи с этим становится нецелесообразным изменять толщину стенки трубы, чтобы получить требуемое распределение мощности. Убедитесь, что максимальная эффективность (ЭФФЕКТИВНОСТЬ) может быть подходящим выбором частоты тока катушки индуктивности.

Зависимость электрического тока от частоты довольно сложна и определяется характером части и ее состоянием. Для тел с круглым поперечным сечением эффективность обычно увеличивается с увеличением частоты, стремясь к предельному значению. Для полых цилиндров существует оптимальная частота, при которой коэффициент эффективности максимизируется. Допустимая зона изменения переменных параметров (в представленном случае, частота) определяется диапазоном рабочих частот для сквозного нагрева стены с заданными электрофизическими характеристиками материала.

Зависимость электрического КПД (ЭФФЕКТИВНОСТЬ) от частоты определяется как:

$$\eta_{\text{э}} = \frac{1}{1 + \frac{\Pi_1 \rho_1 \Delta_2}{\Pi_2 \rho_2 \Delta_1}} \quad (3.1)$$

Π_1, Π_2 – периметры индуктора и цилиндра соответственно

Частота связана с мощностью $P(t)$ источников внутреннего тепловыделения, как $P(t) = \eta(\zeta) U_f(t)$,

$U(t)$ – напряжение на индукторе;

$\eta(\zeta)$ – известная нелинейная зависимость электрического КПД индуктора

от параметра $\zeta = 1 - \frac{1,46\Delta_z}{R}$, характеризующая влияние частоты тока на степень проявления поверхностного эффекта,

$D = 503 \sqrt{\frac{r}{f}}$ – глубина проникновения тока, которая напрямую зависит от частоты источника питания [79, 80].

Используем аналитическую зависимость для того, чтобы выявить оптимальную частоту. Данный метод состоит в определении следующих основных параметров:

$$m_2 = \frac{D_2}{\sqrt{2}\Delta_2} \quad (3.2)$$

m_2 - дополнительный параметр расчета индуктора;

D_2 - диаметр изделия нагрева.

Определим коэффициенты А и В для таблице 3.1 по найденному значению m_2 :

Таблица 3.1 – Расчетные данные

m_2	A	B	m_2	A	B
0,1	0,010	1,000	5,000	0,240	0,280
0,5	0,030	0,990	6,000	0,210	0,240
1,0	0,120	0,980	8,000	0,160	0,180
1,5	0,250	0,910	10	0,130	0,140
2,0	0,340	0,770	15	0,090	0,090
2,5	0,380	0,620	20	0,071	0,071
3,0	0,360	0,500	25	0,057	0,057
3,5	0,330	0,410	30	0,047	0,047
4,0	0,290	0,360	40	0,035	0,035

Активные и внутреннее реактивные сопротивления цилиндрической заготовки:

$$r_2 = \pi \rho_2 m_2^2 \frac{A}{L_2}; \quad x_2 = \pi \rho_2 m_2^2 \frac{B}{L_2}. \quad (3.3)$$

Реактивность рассеивания индуктора:

$$x_s = \frac{2\pi^3 f \times 10^{-7} (D_1^2 - D_2^2)}{L_2} \quad (3.4)$$

Индуктивное сопротивление пустующего индуктора:

$$x_0 = \frac{x_{10} k_1 L_1}{(L_1 - k_1 L_2)}, \quad (3.5)$$

$$k_1 = \frac{2,3}{2,3 + \frac{D_1}{L_1}}; \quad (3.6)$$

$$x_{10} = 2\pi^3 f \times 10^{-7} \frac{D_1^2}{L_1}. \quad (3.7)$$

Коэффициент активного сопротивления предмета исследования:

$$C = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{x_0}\right)^2 + \left(1 + \frac{x_s + x_2}{x_0}\right)^2} \quad (3.8)$$

Активное сопротивление предмета исследования:

$$r_2' = Cr_2 \quad (3.9)$$

Приведенное реактивное сопротивление системы «индуктор–изделие»:

$$x_2' = C \left[x_s + x_{2,м} + \frac{(x_s + x_{2,м})^2 + r_2^2}{x_0} \right]. \quad (3.10)$$

Активное r_1 и внутреннее реактивное x_1 сопротивления индуктирующего провода

$$r_1 \approx x_1 = \frac{\pi D_1 \rho_1}{k_1 \Delta_1 L_1}. \quad (3.11)$$

Эквивалентное сопротивление:

$$r_3 = r_1 + r_2'; \quad x_3 = x_1 + x_2'; \quad z_3 = \sqrt{r_3^2 + x_3^2} \quad (3.12)$$

КПД индуктора

$$\eta_3 = \frac{r_2'}{r_3}. \quad (3.13)$$

Коэффициент мощности индуктора во время окончания нагрева:

$$\cos \varphi = \frac{r_3}{z_3}. \quad (3.14)$$

На рисунке 3.6 мы можем увидеть глубину проникновения тока в стенки цилиндра в зависимости от различных частот, а также распределение тока по всей длине нагреваемого объекта в зависимости от различных частот.

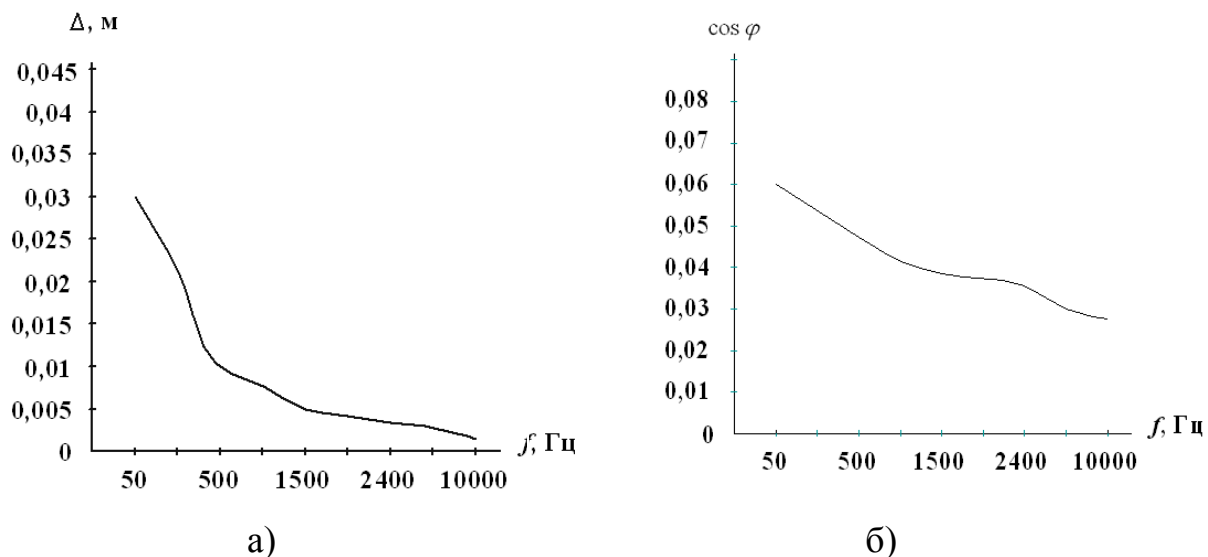


Рисунок 3.6 - Зависимость частот

Из данных зависимостей мы можем сделать следующий вывод, что при частоте 50 Гц проникновение тока намного больше, чем стенки цилиндра. Данное означает, что какая-то часть энергии остается в шнеке. В таблице 3.2. мы можем увидеть зависимость КПД и $\cos \varphi$ для различных частот.

Таблица 3.2 - Зависимость КПД и $\cos \varphi$ для различных частот

f , Гц	50	500	1000	1500	2000	2400	3000	5000	10000
η	0,602	0,65 3	0,650	0,669	0,662	0,672	0,667	0,666	0,701
$\cos \varphi$	0,549	0,47 1	0,419	0,392	0,361	0,349	0,325	0,276	0,203

Для рабочей частоты мы выбираем 50 Гц., учитывая ряд необходимых конструктивных требований к индукционной системе, а конкретно, минимизирование размеров индуктора и условия его соединения параметров индуктора с источником питания. При помощи более высокой частоты мы понижаем $\cos \varphi$.

Алгоритм работы системы состоит из следующих этапов:

- засыпание балластным материалом и разогрев в течении следующих 1800 с;
- удаление балласта и уточненный разогрев шнека до заданной температуры в течении 600 с;
- цикл работы - три порции сырья, в котором время нагрева одной порции около 600 с;
- нагрев системы до определенной температуры.

Важной задачей является выбрать оптимальное время нагрева для одной порции сырья. Анализируя результаты расчета, мы получим оптимальное время нагрева в 600 секунд, а дальнейшее увеличение времени неизбежно приведет к повышенным затратам электроэнергии.

Исследование, которое мы провели для выбора оптимальной частоты, в которой бы обеспечивался, нагрев полимерного материала от цилиндра пластикации и шнека показало нам, что нам нужно брать частоту 50 Гц или ниже. Если мы будем применять нестандартную частоты, то это повлечет за собой неоправданные расходы, которые будет связаны с использованием согласующего оборудования. В связи с этим, если учитывать ряд конструктивных требований к системе нагрева, в частности, минимизировать размер индуктора и условия согласования его параметров с источником питания, в качестве рабочей мы принимаем частоту 50 Гц.

3.4. Параметры системы индукционного нагрева для производства пластмасс

Для создания рабочей схемы используется стандартное оборудование: понижающий трансформатор и конденсаторы. В качестве регулятора используется микропроцессорный таймер, который обеспечивает включение индуктора на любое заданное время. На рисунке 4.1 представлена наглядная схема установки индукционного нагрева для производства пластмассы методом литья. Данной установка работает при помощи программного управления, в

котором задается точность и минимум времени нагрева. На базе рабочей станции создается система управления нагревом изделия, которая в свою очередь подключена к шкафу управления.

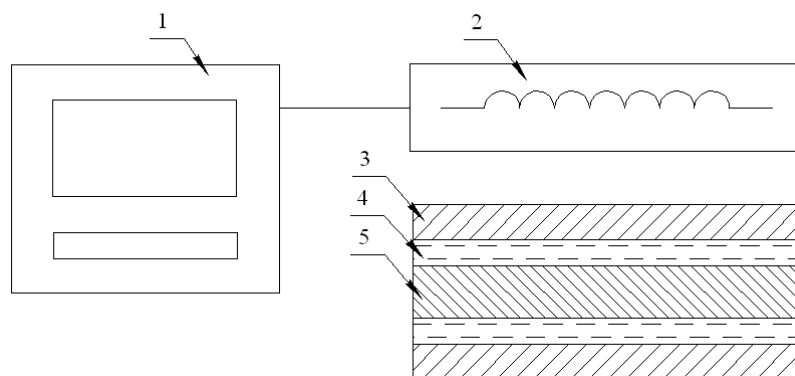


Рисунок 4.1 - Схема индукционного нагрева

1 – станция, 2 – индуктор, 3 – цилиндр пластикации,
4 - полимер, 5 – шнек.

Рабочая станция AWS – 825 В/ 825PB присоединяется к внешним устройствам с помощью преобразователей ADAM 4018 и ADAM – 4021, которые выпускаются фирмой Advantech. Блоки ADAM – 4018 представляют собой модули аналогового ввода на 8 каналов для подключения термопар. Они содержат 16 – разрядный АЦП, 2 однополюсных канала и 6 дифференциальных каналов. Блоки ADAM – 4021 предназначены для вывода аналогового сигнала и содержат в себе 12 – разрядный ЦАП, в них содержится программа для настройки выхода сигнала в виде напряжения (В) или тока (мА), могут контролировать текущее состояние выхода и дают возможность запрограммировать скорость изменения сигнала на выходе от 0,125 до 128 А/с или от 0,0625 до 64 В/с. Данные блоки имеют гальваническую изоляцию, которая рассчитана на напряжение 500 В. Помимо этого введен преобразователь ADAM 4521, который дает возможность перейти от интерфейса RS – 232 к интерфейсу RS – 485. Преобразователь RS-232/RS-485 содержит гальваническую изоляцию.

Сейчас, в большинство первичных преобразователей и измерительных приборов, которые являются интеллектуальными устройствами, встраивают цифровой интерфейс RS-232. Данный интерфейс широко хоть и распространен, но сочетает в себе ряд характерных недостатков, которые ограничивают его применение в системе промышленной автоматике. Проявляется это в основном в небольшой протяженности линий связи и неспособности построить многоточечные сети. Интерфейс RS-485 лишен указанных недостатков. Основываясь на нем можно построить сравнительно недорогие протяженные информационные сети любой сложности конфигурации для обмена данными между десятком и более устройств. И каждое из этих устройств в данной сети будет иметь уникальный адрес.

Этим образом, данная установка для управления процессом индукционного нагрева позволяет вести контроль температуры в изделии, и отображает влияние возмущающего воздействия определенной программы управления.

Вывод:

1. Предложили практическую реализацию системы индукционного нагрева для производства изделий из пластмассы методом литья для работы на промышленной частоте.
2. Разработан алгоритм функционирования индукционной установки для работы в технологических комплексах по производству пластмассы методом литья.
3. При помощи, разработанной конечно - элементной модели электромагнитного поля в многослойной цилиндрической системе, которая состоит из элементов с различными электрофизическими свойствами, мы провели расчеты и выполнили анализ распределения мощности электромагнитных источников тепла. В результате чего мы получили диаграммы распределения плотности токов, мощности и напряженности в цилиндре и шнеке.
4. Мы получили тепловые поля в нагреваемом полимерном материале

при помощи алгоритма, который был разработан для решения тепловой задачи, выполнили анализ и определили параметры индукционного нагревателя.

5. Сделали обоснованный выбор частоты тока индуктора, который может обеспечить максимальный КПД, при данном распределении электромагнитной мощности в цилиндре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ, который был проведен для технологии нагрева при производстве изделий из пластмассы, показал, что методы, используемые в настоящее время, не обеспечивают необходимой точности и быстродействия системы. Однако, есть иные конструкции индукционных нагревателей, которые можно использовать, как часть технологического процесса изготовления изделий из пластмассы.

2. Мы рассмотрели метод, который показал нестандартные особенности использования индукционного нагрева и который отличает его от известных индукционных нагревателей. Для разработки рациональной конструкции индуктора, которая удовлетворяла бы всем требованиям технологии, она должна базироваться на оптимальном проектировании и методах математического моделирования. Нужно получить комплексное решение задачи оптимально управления технологическим процессом нагрева и оптимального проектирования для того, чтобы получить высокоэффективную индукционную нагревательную установку.

3. Рассмотрен алгоритм расчета внутренних источников тепла, конечно-элементную модель и метод расчета температурных распределений в многослойной цилиндрической системе «цилиндр пластикации – полимерный материал – шнек».

4. Был разработан вычислительный алгоритм для расчета тепловых и электромагнитных полей в системе «индуктор – цилиндр пластикации – полимерный материал – шнек», который позволил рассчитать распределение температуры в полимерном материале на всех участках при нагреве внутренними источниками тепла, которые образуются под действием вихревых токов.

5. Получен алгоритм распределения удельной мощности источников внутреннего тепловыделения в основе которого лежат математические модели процесса индукционного нагрева, которые мы рассмотрели в работе.

6. Разработан алгоритм для поиска необходимой конструкции

индуктора, который мы рассчитали на основе последовательного решения электромагнитной и тепловой задач.

7. На основании экспериментов, которые мы провели, определены энергетические характеристики индукционного нагревателя. В согласовании с предложенным способом были определены параметры, а также разработана конструкция системы индукционного нагрева.

8. В итоге предложен путь реализации системы индукционного нагрева, который обеспечит требуемые показатели качества нагрева.

Список использованных источников

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст]. – Москва, Стандартинформ, 2014.
2. ГОСТ 8.177-85. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений теплопроводности твердых тел в диапазоне температур 90-300 К : Взамен ГОСТ 8.177-76. - Изд. офиц. ; Введ. 01.01.87. - Москва : Изд-во стандартов, 1985. - 4 с.
3. Аполлонский С. М. Электромагнитные поля технического оборудования [Электронный ресурс] : монография. Т. 1. Методы математической физики и их использование при расчетах электромагнитных полей / С. М. Аполлонский. - Москва : Русайнс, 2016. - 280 с.
4. Бар В. И. Электротехнологические установки и их источники питания : учеб. пособие / В. И. Бар. - ТГУ. - Тольятти : ТГУ, 2005. - 85 с.
5. Бородин И. Ф. Автоматизация технологических процессов : учеб. для вузов / И. Ф. Бородин, Ю. А. Судник. - Москва : КолосС, 2004. - 344 с.
6. Головин Г. Ф. Технология термической обработки металлов с применением индукционного нагрева / Г. Ф. Головин, Н. В. Зимин ; под ред. А. Н. Шамова. - 5-е изд., перераб. и доп. - Ленинград : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1990. - 87 с.
6. Иванов А. А. Автоматизация технологических процессов и производств : учеб. пособие для студентов вузов / А. А. Иванов. - 2-е изд., испр. и доп. ; Гриф УМО. - Москва : ФОРУМ : [ИНФРА-М], 2016. - 223 с.
7. Сапожников С.З. Китанин Э.Л. Техническая термодинамика и теплопередача: Учебник для вузов. - СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. - 319 с.
8. Кирпанев А. В. Электромагнитное поле : Теория идентификации и ее применение : учеб. пособие для вузов / А. В. Кирпанев, В. Я. Лавров. - Москва : Вузовская книга, 2002. - 278 с.
9. Кияткин Р. П. Расчет статических и стационарных электромагнитных полей

- методом сеток : учеб. пособие / Р. П. Кияткин, В. Л. Чечурин ; Ленинградский политехнический ин-т им. М. И. Калинина. - Ленинград : ЛПИ, 1982. - 68 с.
10. Кудинов В. А. Техническая термодинамика : учеб. пособие для вузов / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов. - 3-е изд., испр. ; Гриф МО. - Москва : Высш. шк., 2003. - 261 с.
11. Кудрин Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий : учеб. для вузов / Б. И. Кудрин. - Гриф УМО. - Москва : Интернет Инжиниринг, 2007. - 670 с.
12. Киреева Э. А. Электроснабжение и электрооборудование цехов промышленных предприятий : учеб. пособие для студентов вузов, обуч. по направлению подготовки 140600 "Электротехника, электромеханика и электротехнологии" / Э. А. Киреева. - Гриф УМО. - Москва : Кнорус, 2011. - 368 с.
13. Мазур Л. С. Техническая термодинамика и теплотехника : учеб. пособие для вузов / Л. С. Мазур. - Гриф УМО. - Москва : ГЭОТАР-МЕД, 2003. - 350 с.
14. Медведев В. А. Расчет автономных резонансных инверторов для индукционного нагрева : учеб.-метод. пособие / В. А. Медведев ; ТГУ ; Электротехн. фак. ; каф. "Пром. электроника". - ТГУ. - Тольятти : ТГУ, 2010. - 46 с.
15. Раувендааль К. Экструзия полимеров / К. Раувендааль ; при участии П. Дж. Грэмманна [и др.] ; пер. с англ. яз. 4-го изд. под ред. А. Я. Малкина. - Санкт-Петербург : Профессия, 2008. - 762 с.
16. Слухоцкий А. Е. Индукторы / А. Е. Слухоцкий ; под ред. А. Н. Шамова. - 5-е изд., перераб. и доп. - Ленинград : Машиностроение, 1989. - 69 с.
17. Салтыков В. М. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике : (источники электромагнитных полей) : учеб. пособие / В. М. Салтыков ; ТГУ ; каф. "Электроснабжение промышленных предприятий". - ТГУ. - Тольятти : ТГУ, 2003. - 80 с.
18. Салтыков В. М. Электромагнитная совместимость дуговых сталеплавильных печей в системах электроснабжения : учеб. пособие / В. М.

- Салтыков, О. А. Салтыкова ; ТолПИ. - ТГУ. - Тольятти : ТолПИ, 1998. - 88 с.
19. Салтыков В. М. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике : (источники электромагнитных полей) : учеб. пособие / В. М. Салтыков ; ТГУ ; каф. "Электроснабжение промышленных предприятий". - [2-е изд.] ; ТГУ. - Тольятти : ТГУ, 2007. - 69 с.
20. Салтыков В. М. Влияние характеристик дуговых сталеплавильных печей на качество напряжения в системах электроснабжения : [монография] / В. М. Салтыков, О. А. Салтыкова, А. В. Салтыков. - Москва : Энергоатомиздат, 2006. - 245 с.
21. Суворова И. А. Электротехнологические промышленные установки и освещение : учеб. пособие для вузов / И. А. Суворова ; Вятский гос. ун-т. - ВУЗ/изд. - Киров : ВятГУ, 2007. - 97 с.
22. Техническая термодинамика и основы теплообмена : упражнения и задачи : учеб. пособие / А. П. Уханов [и др.]. - Пенза : РИО ПГСХА, 2004. - 206 с.
23. Техническая термодинамика и теплотехника [Электронный ресурс] : учеб. пособие для вузов / Т. Н. Бахшиева [и др.] ; под ред. А. А. Захаровой. - 2-е изд., испр. - Москва : Академия, 2008.
24. Федина В. В. Техническая термодинамика : учеб. пособие для студентов вузов, обуч. по направлению подготовки "Теплоэнергетика и теплотехника" / В. В. Федина, А. С. Тимофеева, Т. В. Никитченко. - Гриф УМО. - Старый Оскол : ТНТ, 2015. - 161 с.
25. Dargahi, M. Controlling current and voltage type interfaces in power-hardware-in-the-loop simulations / M. Dargahi, A. Ghosh, P. Davari – IET, Power Electronics – 2014. - vol. 7, no. 10.
26. Graaff, Roald A.A. de. Flexible distribution systems through the application of multi back-to-back converters: Concept, implementation and experimental verification / Roald Antonius Adrianus de Graaff // Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2010.
27. Ayasun, S. Electric machinery diagnostic / S. Ayasun, S. Vallieu, R. Fischl. – IEEE, Power Electronics and Drives - 2003. - vol. 15, no. 2.

28. Dargahi, M. Controlling current and voltage type interfaces in power-hardware-in-the-loop simulations / M. Dargahi, A. Ghosh, P. Davari – IET, Power Electronics – 2014. - vol. 7, no. 10.
29. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies // IEEE Std 421.5. 1992. 56 c.
30. Hartmann A.K., Rieger H. Optimization Algorithms in Physics. — Berlin: Wiley-VCH, 2002. 383 c.