

Министерство высшего и среднего специального
образования РСФСР

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С.П.Королева

В.А.Глуценков

ПРОЕКТИРОВАНИЕ

ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ

И НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Учебное пособие, ч. II

Утверждено редакционным советом
института 22 июня 1975 г.

Куйбышев 1975

Настоящее учебное пособие предназначено студентам металлургического факультета, специализирующимся по обработке металлов давлением, и посвящено расчету и проектированию индукционных нагревательных устройств.

Методическое пособие знакомит студентов с объемом и требованиями, предъявляемыми к курсовому проекту, а также закрепляет и расширяет знания по индукционному нагреву, полученные в общем курсе лекций "Нагревательные устройства".

Внимание, уделяемое индукционным устройствам, объясняется преимуществом этого метода нагрева и широким его распространением в цехах обработки металлов давлением (нагрев заготовок под прокатку, прессование, ковку, штамповку).

Кроме того, в настоящем методическом пособии сделана попытка систематизировать материалы различных источников и тем самым облегчить работу над курсовым проектом.

Рецензент доцент Ж е м к о в Л.Д.

СОДЕРЖАНИЕ И ОБЪЕМ ПРОЕКТА

В индивидуальном задании, выдаваемом студенту на первом занятии, указывается:

назначение проектируемого нагревательного устройства;
марка материала и размеры подлежащих нагреву заготовок;
производительность индукционной печи;
спецтема проекта.

Например, спроектировать индукционную печь методического (периодического) действия для нагрева под прессование (прокатку, ковку, термообработку и т.д.) заготовок \varnothing 200 мм, длиной 300 мм из материала В95. Производительность печи 10 заготовок в час.

Спецтема проекта предусматривает углубленную проработку отдельных вопросов расчета, исследования или конструирования индукционных устройств.

Проект оформляется в виде пояснительной записки (объемом 25-30 страниц) и чертежей. Графическая часть включает: общий вид индукционного нагревателя с необходимыми видами, разрезами, сечениями; общую компоновку нагревательного устройства и детализацию отдельных его узлов (по указанию преподавателя); спецтему проекта. Количество листов: 2-3 формата 24(A1).

Обязательные разделы пояснительной записки.

1. Введение.
2. Описание физико-механических свойств материала заготовок.
3. Обоснование температуры нагрева и допустимого перепада температур поверхностных и центральных слоев материала.
4. Сущность, основные законы и явления индукционного нагрева.
5. Эскизное проектирование печи.
6. Расчет индуктора.
7. Расчет системы охлаждения индуктора.
8. Описание конструкции индукционной печи.
9. Указание мероприятий по обеспечению техники безопасности при работе печи.
10. Спецтема проекта.
11. Перечень использованной литературы.

Введение

В этом разделе пояснительной записки: обосновывается необходимость нагрева заготовок в процессах обработки металлов давлением; перечисляются виды нагрева и сравниваются их технико-экономические показатели; описываются преимущества и недостатки индукционного нагрева; подчеркивается роль советских ученых в развитии индукционного нагрева.

Объем раздела 3-4 с.

Литература [1]-[5].

От правильного выбора способа нагрева во многом зависят показатели работы прокатных, кузнечных и прессовых производств. Для обеспечения высокого качества изделий устройства должны обеспечить необходимое термическое состояние заготовок, сохранить целостность металла и химсостав поверхностных слоев.

В настоящее время наиболее широко применяются пламенные печи с использованием жидкого и газообразного топлива и ряд видов электронагрева.

В отечественной и зарубежной практике имеется тенденция к более широкому применению электронагрева и почти полному отказу от использования мазутных печей.

При проведении технического сравнения различных методов нагрева следует обратить внимание на качество нагрева, минимальное время нагрева, возможность механизации и автоматизации труда рабочих. Лучшим критерием оценки эффективности различных способов нагрева является себестоимость нагрева (желательно привести сравнение составляющих себестоимости).

О низкой стоимости индукционного нагрева говорят, например, данные, приведенные в табл. I.

Себестоимость нагрева I т металла, руб.

Таблица I

Н а г р е в			
Индукционный	Контактный электр.	Пламенный в печах	
		газовых	мазутных
13,63	29,96	14,68	15:45

Индукционный нагрев в настоящее время распространен почти во всех отраслях машиностроения, в цехах металлургических, авиационных, автомобильных и многих других предприятий.

Внедрение индукционного нагрева позволяет значительно снизить себестоимость готовой продукции. Например, освоение индукционного нагрева токами промышленной частоты алюминиевых заготовок перед прокаткой на стане 250 (взамен трех электропечей сопротивления) позволило повысить на 30% производительность стана, улучшить качество конечного продукта, что дало экономический эффект 150 тыс. руб. в год.

2. Описание физико-механических свойств материала заготовок

В этом разделе курсового проекта должна быть дана краткая характеристика сплава, приведена таблица физических (γ ; ρ ...), теплофизических (C ; λ ; α ...) и механических свойств (σ_{β} ; $\sigma_{0,2}$; σ_{10}) нагреваемого материала и их зависимость от температуры.

Объем раздела 1,5 - 2 с.

Литература [6]-[9].

3. Обоснование температуры нагрева и допустимого перепада температуры поверхностных и центральных слоев материала

С учетом вида и особенностей дальнейшей пластической обработки нагретых заготовок, а также с учетом диаграммы пластичности назначаются температура нагрева заготовок и допустимый перепад нагрева (Δt) поверхностных и центральных слоев. Приводится оценка явлений, сопровождающих деформацию металла при недогреве и перегреве металла и расширении сверх допустимого перепада Δt .

Объем I - 1,5 с.

Литература [10] - [12].

4. Сущность, основные законы и явления индукционного нагрева

Сущность индукционного нагрева заключается в том, что металлическая заготовка, помещенная в переменное магнитное поле, нагревается за счет джоулева тепла, возникающего в ней вследствие индуцированных вихревых токов.

Исходными уравнениями для решения задач, связанных с определением напряженности электромагнитного поля, поглощением электромагнитной энергии, распределением тока и т.д., являются уравнения Максвелла

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} &= \frac{4\pi\mu\partial H_y}{c^2\rho\partial t}; \\ \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} &= \frac{4\pi\mu\partial E_x}{c^2\rho\partial t}, \end{aligned} \quad (I.1)$$

где H и E - составляющие магнитного и электрического поля соответственно.

В индукционных нагревательных установках применяется синусоидальный переменный ток. Поэтому решение уравнений (I.1) для индукционного нагрева можно записать в виде

$$\begin{aligned} E_x &= E_0 \exp\left(-\frac{2\pi z}{c\sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}}\right) \cos\left(2\pi f t - \frac{2\pi z}{c\sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}}\right); \\ H_x &= H_0 \exp\left(-\frac{2\pi z}{c\sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}}\right) \cos\left(2\pi f t - \frac{2\pi z}{c\sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}} - \varphi\right), \end{aligned} \quad (I.2)$$

где c - скорость распространения электромагнитной волны в пустоте;

μ - магнитная проницаемость;

f - частота тока.

Эти уравнения - уравнения волны, затухающей в направлении z . Первый множитель показывает, как меняется амплитуда, второй - как меняется фаза волны по мере ее продвижения в глубь металла.

Плотность тока в каждом участке металла пропорциональна напряженности электрического поля

$$i = E/\rho. \quad (I.3)$$

Кривая спада амплитуды плотности тока при продвижении от поверхности в глубь металла представляет собой огибающую семейства затухающих синусоид

$$i = i_0 \exp\left(-\frac{2\pi z}{c} \sqrt{\frac{\mu f}{\rho}}\right),$$

где i_0 - максимальная плотность тока на поверхности металла.

На расстоянии z от поверхности металла, определяемом по формуле

$$z = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}},$$

амплитуда волны уменьшится в $e = 2,718$. раз.

Расстояние Z принято называть глубиной проникновения тока, в практических единицах она равна

$$\delta = 50300 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \text{ мм.}$$

Следует заметить, что глубина проникновения тока в пределах δ — понятие условное. Оно введено только для упрощения расчетов по индукционному нагреву. Имеется в виду, что в пределах δ вихревые токи выделяют 90% всего тепла при постоянной амплитуде плотности тока i_0 .

Тепло, выделяемое током, пропорционально квадрату действующего значения плотности тока в данном участке металла. Поэтому кривая спада интенсивности выделяемого тепла является экспонентой, показатель которой равен удвоенному показателю экспоненты спада плотности тока.

В записке должна найти отражение природа сопутствующих индукционному нагреву эффектов: поверхностного, кольцевого, краевого и эффекта близости.

Объем раздела 4-4,5с.

Литература [1], [4], [13].

Остальные вопросы разд. I-4 не требуют дополнительных пояснений, так как имеют в основном описательный характер.

Завершение работы над разд. I-4 соответствует выполнению 15% общего объема курсового проекта.

5. Эскизное проектирование печи

Прежде чем приступить к расчету нагревательного устройства, необходимо познакомиться с принципиальной конструкцией индукционной печи, провести анализ конструктивных особенностей отдельных ее узлов, применяемых материалов и т.д. По результатам анализа обоснованно выбрать конструкцию печи, наиболее отвечающую требованиям задания, и необходимые для дальнейших расчетов исходные теплофизические и электрические величины.

В зависимости от режима нагрева заготовок индукционные нагреватели обычно делятся на четыре типа: методического действия, периодического действия, комбинированные и непрерывного нагрева.

У нагревателей методического действия в индукторе нагревается одновременно несколько заготовок, последовательно перемещаемых

по направляющим через определенные интервалы времени. При смене заготовок индуктор не отключается.

В нагревателях периодического действия одновременно нагревается одна заготовка. Во время смены заготовок индуктор отключается.

Комбинированные индукционные нагреватели могут использоваться как в качестве методических, так и в качестве периодических нагревательных устройств.

В нагревателях непрерывного нагрева заготовки (обычно длинные) безостановочно перемещаются с постоянной скоростью через индуктор.

Различают нагревательные установки промышленной (50 Гц) и повышенной частоты (до 8000 Гц и более), отличающиеся как с точки зрения применения электротехнического оборудования, так и из-за различных конструктивных решений индукторов, механизации, возможностей регулирования и т.д.

В общем случае индукционное нагревательное устройство состоит из источника питания, индуктора, в котором производится нагрев заготовки, конденсаторной батареи, комплекта измерительных приборов, токопроводов, системы автоматического управления, механизма подачи и выгрузки заготовок.

Источники питания. При применении токов промышленной частоты питание индукционных нагревательных установок производится от обычных силовых трансформаторов или непосредственно от сети.

Ток с частотой более 50 Гц вырабатывается генераторами токов повышенной частоты. В качестве таких генераторов применяют: электромашинные преобразователи, статические преобразователи частот (ионные, ламповые) и искровые. Коэффициент полезного действия, диапазон рабочих частот перечисленных преобразователей можно иллюстрировать табл.2.

Таблица 2

Тип преобразовательного агрегата	Диапазон частот, Гц	к.п.д., %
Машинный	500 - 10000	70 - 85
Ионный	500 - 2000	90 - 95
Ламповый	50000 - 10 ⁶	50 - 60
Искровой	50000 - 300000	30 - 40

Искровые генераторы из-за низкого к.п.д. в настоящее время не применяются.

Электромашинный генератор состоит из электрического двигателя трехфазного тока (асинхронного или синхронного), включаемого в сеть промышленной частоты. На одном валу с двигателем монтируется генератор, который состоит из зубчатого ротора, вращающегося внутри статора. В пазах статора уложены две обмотки. Одна обмотка - обмотка возбуждения - присоединяется к внешнему источнику постоянного тока и создает магнитное поле вокруг ротора. При вращении зубчатого ротора во второй (статорной) обмотке индуцируется переменный ток повышенной частоты. Подробные конструкции, характеристики, принцип действия и методы расчета электромашинных преобразователей частоты изложены в работах [14] - [16]. Электромашинные преобразователи получили в настоящее время наибольшее распространение. Параметры некоторых отечественных машинных генераторов тока повышенной частоты приведены в табл.3.

Таблица 3

Характеристика	ВГО-500-2500	ПВО-500-2500	ВГО-250-2500	ПВС-100-2500	ПВ-50-2500	ПВ-100-8000	ПВВ-30-8000
Частота, Гц	2500	2500	2500	2500	2500	8000	8000
Мощность, кВт	500	500	250	100	50	100	30
Напряжение, В	1500/750	750/375	750/375	750/375	750/375	750/375	750/375
к.п.д., %	84	-	82	78	76	72	-

Под статическими преобразователями частоты понимают неподвижные электрические устройства, преобразующие ток промышленной частоты в переменный ток другой частоты. Статический преобразователь частоты осуществляет двойное преобразование: переменного тока промышленной частоты в постоянный (выпрямление) и постоянного тока в переменный ток заданной частоты (инвертирование). Выпрямление и инвертирование осуществляются с помощью управляемых вентильных элементов: ионных (тиратроны, игнитроны, экситроны и т.д.) или полупроводниковых (тиристоры). Схема выпрямления может быть любой, но наибольшее распространение получили трех-

фазные однотактные и двухтактные схемы [17]. Инвертор в рассматриваемых преобразователях, как правило, используется автономный, но его схемы весьма разнообразны. Например, на рис.1 дана принципиальная схема однотактного (а) и двухтактного (б) параллельных инверторов.

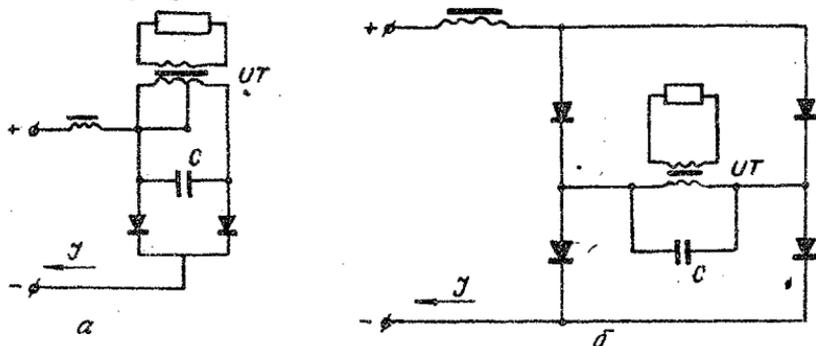


Рис.1. Схема однотактного (а) и двухтактного (б) инверторов

Принцип работы инвертора состоит в следующем: при поочередном отпирании вентилей происходит периодический перезаряд конденсатора с частотой отпирания вентилей. Поскольку конденсатор включен параллельно первичной обмотке трансформатора, то на его вторичной обмотке возникает переменное напряжение с частотой коммутации вентилей.

Несмотря на то, что статические преобразователи частоты на ионных управляемых вентилях известны давно и разрабатывались и использовались многими фирмами, они не нашли широкого применения. Это связано с недостаточной эксплуатационной надежностью самих вентилей. Поэтому перспективным является создание статических преобразователей на управляемых полупроводниковых вентилях - тиристорах.

Принцип действия преобразователей частоты на тиристорах не отличается от принципа действия преобразователей на ионных вентилях [18] - [20].

Разработаны и разрабатываются тиристорные преобразователи мощности 50, 100, 250 и 500 кВт на частоту до 3000 Гц.

Ламповые генераторы выполняются на частоту 50-1000 кГц и для целей индукционного нагрева строятся исключительно с трехэлектродными лампами (рис.2).

Ленинградский завод высокочастотных установок выпускает индукционные печи с ламповым генератором мощностью 30, 60, 100 и 200 кВт и с частотой тока 70 кГц.

Вопросы различных схем ламповых генераторов, принцип их работы и модернизации изложены в работах [21], [22].

Следует отметить, что разработка новых схем ламповых генераторов (независимого возбуждения и подачи сеточного напряжения от специального генератора прямоугольных импульсов) дает возможность создать ламповые генераторы с высоким к.п.д. (90-95%).

Ламповые генераторы применяются в основном для таких технологических процессов, как закалка инструмента, пайка, нагрев диэлектриков, закалка малогабаритных деталей, внутренних поверхностей и т.п.

Для целей обработки металлов давлением наиболее подходят индукционные установки с электромашинным, ионным или тиристорным статическим преобразователем. И те и другие преобразователи по своим техническим данным удовлетворяют требованиям эксплуатации индукционных установок повышенной частоты.

Применение статических преобразователей частоты взамен электромашинных снижает расход электроэнергии на 10-30% из-за более высокого к.п.д. Кроме того, машинный генератор не только имеет более низкий к.п.д. при номинальной нагрузке, но и отличается резким снижением к.п.д. при уменьшении нагрузки.

Другим важным преимуществом статического преобразователя частоты как источника питания для индукционных установок является возможность плавного изменения частоты в процессе работы. Это обеспечит полное использование мощности преобразователя в условиях изменяющихся параметров нагрузки, что принципиально невозможно при источнике питания с фиксированной частотой (например, при машинном генераторе).

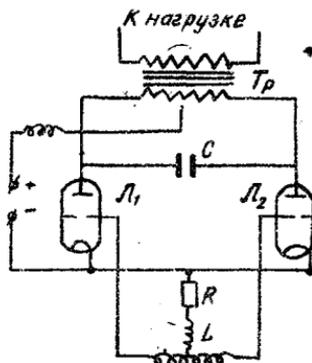


Рис. 2. Схема лампового генератора

Стоимость же статических преобразователей на сопоставимые параметры в диапазоне частот 500-1000 Гц в настоящее время превышает стоимость электромашинных в 1,5-2 раза. С организацией серийного производства и по мере снижения цен на ионные и полупроводниковые вентили стоимость статических преобразователей, очевидно, будет снижена до уровня стоимости электромашинных.

Практически к.п.д. высокочастотного генератора бывает значительно ниже, чем указано в его паспортных данных. Объясняется это, во-первых, низким коэффициентом использования генератора по мощности и, во-вторых, большим процентом работы генератора вхолостую. Например, полный коэффициент использования машинного генератора определяется формулой

$$\eta = \frac{P_r}{P_n} \frac{\tau_n}{\tau_n + \tau_{x.x}}$$

где τ_n - время нагрева;

$\tau_{x.x}$ - время холостого хода;

P_n - номинальная мощность генератора;

P_r - фактическая мощность, отдаваемая генератором.

В табл.4 приведена зависимость к.п.д. генератора от коэффициента загрузки η и продолжительности нагрева ПВ, %.

Таблица 4

Коэфф. загрузки	Продолжительность нагрева ПВ, %				
	20	40	60	80	100
0,4	29,9	46,0	56,0	62,9	68,2
0,6	39,0	56,0	65,7	71,7	76,0
0,8	46,0	62,9	71,7	77,2	81,0
1,0	51,6	68,2	76,0	81,0	84,0

При ПВ = 100%, т.е.

$\tau_{x.x} = 0$ и $\eta = 1$

к.п.д. генератора максимальный.

Таким образом, для увеличения к.п.д. генератора необходимо уменьшить потери холостого хода

и увеличить нагрузку генератора.

С этой целью в цехе применяется индивидуальное и групповое подключение индукционных установок к преобразователю.

Основные схемы подключения:

питание нескольких индукторов от одного генератора с взаимной блокировкой по времени;

одновременное питание нескольких индукционных устройств от одного генератора;

централизованное питание установок индукционного нагрева.

Первый способ группового подключения используется для снижения продолжительности холостого хода генератора путем перевода его на непрерывную работу при $P_r \approx P_H$. В этом случае индукционные установки блокируются по схеме "охлаждение". На каждой печи имеется реле подготовки нагрева, включенное после установки заготовки в индуктор. Как только нагрев на одной печи закончился, автоматически включается другая, заранее подготовленная к работе.

Если мощность, потребляемая нагревательным устройством P_r мала по сравнению с мощностью генератора P_H , то коэффициент использования последнего весьма мал. В таких случаях выгодно питать одновременно от одного генератора несколько нагревательных устройств (второй способ подключения); при этом автоматически поддерживается на генераторе постоянство напряжения. Последнее необходимо, так как включение и отключение одной из нагрузок приводит к колебанию напряжения генератора и, следовательно, к изменению мощности, отдаваемой детали в других устройствах.

Третья схема подключения является общей, объединяющей первые две схемы. К системам централизованного питания следует отнести любые системы, при которых все генераторы работают на общие шины и все первичные устройства получают питание от этих шин.

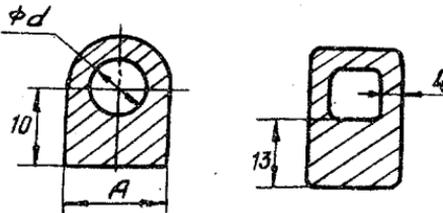
Индуктор. Индуктор является основным элементом индукционного нагревательного устройства. Форма индуктора определяется конфигурацией, размерами и размещением заготовки.

Цилиндрический индуктор состоит из следующих основных элементов: индуктирующего провода, уложенного спиралью, изоляции, направляющих выводов, системы охлаждения, фасадных плит и стяжных болтов.

В качестве индуктирующего провода применяется медная трубка квадратного или прямоугольного сечения, обеспечивающая: 1) минимальные электрические потери; 2) проход расчетного количества охлаждающей воды; 3) размещение на длине индуктора расчетного количества витков.

Для удовлетворения первого требования - минимума электрических потерь, как будет показано ниже, необходимо соблюдать условие $\Delta_{mp} > 1,3 \delta$, где Δ_{mp} - толщина стенки трубки. Для токов повышенной частоты это условие в большинстве случаев соблюдается, так как

глубина проникновения тока в медь при $f = 2500$ Гц равна $\delta = 1,34$ мм и $\Delta_{mp} = 1,3 \cdot 1,34 = 1,74$ мм, в то время как толщина стенки медных трубок при эквивалентном диаметре выше 10 мм по ГОСТ 617-53 доходит до 2,5 мм и больше. Однако при более низких частотах, например, 500 Гц и тем более при промышленной частоте необходимая толщина стенки трубки соответственно $\Delta_{mp} \geq 4,8$ мм и $\Delta_{mp} \geq 13$ мм. Так как медные трубки относительно малого эквивалентного диаметра (порядка 1,5-3 см) не выпускаются с такой толщиной, то во избежание больших потерь в индукторе необходимо применять неравностенные профилированные трубки с утолщенной стенкой, обращенной к нагреваемой заготовке (рис.3).



A	16	18	20	22	26	30	36
d	8	10	12	14	18	22	28

Применение профилированных равностенных трубок выгоднее, чем круглых, так как в этом случае джоулевы потери в индукторе уменьшаются на 10-15% (уменьшается эквивалентный зазор между индуктором и заготовкой) и облегчается выполнение условий 2 и 3.

Рис.3. Профилированный токопровод индуктора

Таблица 5

Размер медных трубок в мм								
Высота	Ширина Толщина стенок		Высот	Ширина Толщина стенок		Высота	Ширина Толщина стенок	
	Ширина	Толщина стенок		Ширина	Толщина стенок		Ширина	Толщина стенок
5	5	1	8	8	1,5	10	10	2
5	10	1	8	12	1,5	10	15	2
8	15	1-1,5	10	20	1,5	10	20	2

Квадратные и прямоугольные равностенные трубки выпускаются промышленностью или могут быть получены из круглой трубки с помощью приспособления. В табл.5 приведены размеры профилированных медных трубок, выпускаемых отечественной промышленностью.

Следует заметить, что использование в качестве индуктируемого провода неравностенных профилированных медных трубок при нагреве заготовок среднего и большого диаметра токами промышленной частоты не всегда экономически целесообразно: увеличенный расход меди в этом случае "съедает" экономию электрической энергии.

Пункты 2 и 3 требований к токопроводу могут иногда противоречить друг другу, так как диаметр трубки, выбранный из условия прохода необходимого количества охлаждающей воды, может оказаться больше расчетного шага витка.

Для обеспечения отвода расчетного количества тепла система охлаждения индуктора выполняется секционированной. Количество секций определяется тепловым и гидравлическим расчетом системы охлаждения и в основном зависит от напора воды при входе в индуктор, который не должен превышать 2 ат. Все секции охлаждения индуктора присоединяются к охлаждающей магистрали параллельно. Секционирование системы водоохлаждения индуктора не означает электрического секционирования, т.е. параллельного присоединения секций индуктора к источнику питания (индуктор может иметь несколько секций охлаждения, электрически оставаясь не секционированным).

Невозможность размещения на заданной длине индуктора расчетного количества витков приводит к необходимости либо выполнения многослойных обмоток, либо снижения напряжения на питающих шинах индуктора. Последнее достигается применением понижающих трансформаторов. Многослойные индукторы конструктивно сложны, требуют повышенного расхода меди и дают низкий к.п.д. всего устройства. Поэтому применяются они довольно редко, в основном при отсутствии на предприятии понижающих трансформаторов.

Иногда для индукционных печей применяются индукторы, составленные из двух электрически параллельно включенных секций, так как в случае применения относительно высоких частот (2500-1000Гц) расчетное число витков оказывается малым. Применение двух секций позволяет при том же напряжении на индукторе иметь двойное число витков и распределить их равномерно по всей длине печи, не делая излишне больших зазоров между витками. Секции соединяются электрически в месте стыка и крайними витками, причем обе секции намотаны в противоположных направлениях. При этом условия магнитные потоки, создаваемые обеими секциями, имеют одинаковое

направление, а в месте стыка обеих секций смежные витки имеют одинаковое напряжение и не требуют усиленной изоляции (рис.4).

Кроме того, электрическое секционирование индуктора применяется с целью равномерной загрузки фаз питающей сети. Подключение однофазных индукционных нагревательных устройств промышленной частоты большей мощности к трехфазной сети вызывает неравномерную загрузку фаз по току, что неблагоприятно сказывается на работе других электрических аппаратов, подключенных к этой питающей системе, так как несимметрия токов вызывает несимметрию напряжений. По ГОСТ 13109-67 на нормы качества электроэнергии длительно допустимая несимметрия напряжений не должна превышать 2%.

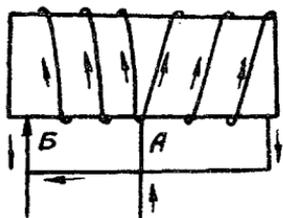


Рис.4. Схема электрического соединения секций индуктора

1000 кВт), выполненных в виде однофазных индукторов, применяются специальные управляемые симметрирующие устройства, обеспечивающие равномерное распределение нагрузок по трем фазам питающей сети.

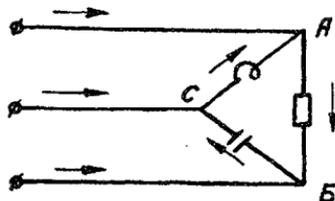


Рис.5. Схема симметрирующего устройства

ряд других схем симметрирования и методику их расчета.

Электрическая и тепловая изоляция индукторов. Для того, чтобы обеспечить более высокий электрический к.п.д. системы индук-

Однако при двух - или трехфазном исполнении индуктора ослабление напряженности поля в местах стыка фаз приводит к неравномерному нагреву слитков по длине. Поэтому фазное исполнение индукторов допустимо для нагрева материалов с высокой температуропроводимостью (медь, латунь, бронза и др.).

Для подключения индукционных нагревателей большой мощности (до 500 -

На рис.5 изображена схема включения однофазной индукционной нагревательной установки в трехфазную сеть с помощью симметрирующего устройства. Предполагается, что колебательный контур индукционной установки полностью скомпенсирован и представляет собой чисто активную нагрузку.

В литературе [23] можно найти

тор-заготовка, необходимо стремиться сократить зазор между индуктором и нагреваемой заготовкой, что, однако, приводит к увеличению тепловых потерь.

При нагреве до температур 500-600°C тепловые потери гораздо меньше электрических, что дает возможность сократить зазор. Чем выше температура нагрева, тем больше тепловые потери, и поэтому толщина изоляции должна быть увеличена. Тепловая изоляция должна не только снизить тепловые потери, но и обеспечить защиту электрической изоляции индуктора от перегрева и разрушения.

Электрическая изоляция должна быть наиболее тонкой, так как в противном случае перепад температур по ее толщине может достигнуть недопустимых значений и привести ее к разрушению и пробоям.

Тепловая и электрическая изоляции должны противостоять большому температурному перепаду по толщине, частым теплосменам, высокой скорости нагрева, а для установок промышленной частоты - значительной вибрации.

Электрическую изоляцию на индуктор наносят, обматывая трубку индуктора изоляционными лентами и покрывая лаком. В качестве изоляционных материалов применяются: лакоткань, тафтяная или киперная лента, стеклолента, масляно-канифольный лак № 302, масляно-битумный лак № 462П, лак К-47 и др. Кроме того, в качестве электрической изоляции часто применяют **миканитовые** шайбы и гильзы. Наиболее надежную электрическую изоляцию индукторов получают заливкой катушки **индуктора** эпоксидным компаундом.

Материалы, применяемые в качестве теплоизоляции при разных рабочих температурах, должны быть различны, как и требования, которые к ним предъявляются.

При 200-300°C тепловые потери незначительны, и индуктор практически не требует тепловой защиты. В этих случаях достаточно наклеить на внутреннюю поверхность индуктора слой асбестового полотна или картона.

При температуре 300-500°C в качестве тепловой изоляции используют асбоцементные трубы.

Нагрев до 500 - 900°C ведется в индукторах, имеющих тепловую изоляцию, выполненную из шамотных колец либо из асбокерамических труб.

В индукторах, предназначенных для нагрева заготовок до температур 1100-1250°C, в качестве огнеупорной части теплоизоляции используются шамотные втулки, а между индуктором и заготовкой прокла-

дывается слой асбестового полотна или картона. В качестве тепловой изоляции для таких рабочих температур применяют жаростойкие бетоны, которые имеют **существенное преимущество** перед шамотной футеровкой.

В процессе эскизного проектирования печи следует выбрать конкретную изоляцию, ознакомиться с технологией ее нанесения и выписать механические и теплофизические свойства выбранной изоляции.

6. Расчет индуктора

Коэффициент полезного действия индуктора. Выбор оптимальной частоты тока. Потери энергии в электромагнитной системе индуктор-заготовка разделяются на электрические и тепловые. Коэффициент полезного действия индуктора для нагрева металла

$$\eta = \eta_e \eta_T, \quad (4)$$

где η_e и η_T - электрический и термический к.п.д. индуктора.

Электрический к.п.д. индуктора равен отношению мощности, выделяемой в детали, ко всей мощности, забираемой индуктором, т.е. активная мощность, выделяемая в нагреваемом металле, является полезной мощностью; активная же мощность, выделяемая в индукторе, - потерями.

Предельное значение электрического к.п.д.

$$\eta_{e, \text{пр}} = \frac{1}{1 + \frac{d_u}{d_z} \sqrt{\frac{\rho_u}{\rho_z \mu}}} \quad (5)$$

где ρ_u - ρ_z - соответственно удельные электрические сопротивления обмотки индуктора и нагреваемого металла, Ом;

μ - магнитная проницаемость металла;

d_u - внутренний диаметр индуктора, м;

d_z - диаметр заготовки цилиндрической формы, м.

Из формулы (5) следует, что η_e прямо пропорционален удельному сопротивлению нагреваемого металла и обратно пропорционален удельному сопротивлению материала обмотки индуктора. Поэтому выгоднее нагревать сплавы металлов, особенно ферромагнитные, как имеющие высокое удельное сопротивление. Менее выгоден нагрев неферромагнитных металлов и металлов с малым удельным электрическим сопротивлением. Например, при нагреве стали $\eta_{e, \text{пр}} \approx 87\%$, а при

нагреве меди $\eta_{э.нр} \approx 50\%$. С уменьшением зазора между индуктором и металлом (d_3/d_3) η_3 увеличивается.

В общем случае на величину электрического к.п.д. влияют геометрические размеры индуктора и заготовки, толщина стенки трубки индуктора, расстояние между витками индуктора и пр. Однако основной величиной, определяющей η_3 , является отношение диаметра заготовки к глубине проникновения тока.

На рис.6 кривая 1 показывает зависимость η_3 от d_3/σ . При $d_3/\sigma > 10$ величина η_3 практически не меняется и достигает максимального значения.

Под термическим к.п.д. понимают отношение

$$\eta_T = \frac{N_M}{N_M + N_n}$$

где N_M - полезная мощность;

N_n - мощность тепловых потерь.

Термический к.п.д. так же, как и электрический, зависит от отношения d_3/σ . Разогрев металла вихревыми токами происходит в основном на глубине σ . Остальное сечение заготовки прогревается за счет теплопроводности. Следовательно, чем больше отношение d_3/σ , тем больше время, необходимое для сквозного нагрева, и тем значительнее потери тепла в окружающую среду через стенки индуктора. Характер зависимости η_T от отношения d_3/σ показан на рис.6 (кривая 2).

Из графиков видно, что зависимости η_3 и η_T от отношения d_3/σ противоположны и, следовательно, общий к.п.д. индуктора (кривая 3) имеет максимум, соответствующий $d_3/\sigma = 3 - 6$.

Наличие максимума на кривой $\eta = f(d_3/\sigma)$ справедливо для любой марки материала нагреваемой заготовки. При к.п.д. $> 55\%$, допустимый диапазон отношения d_3/σ колеблется в пределах 2,5 - 10. Для сталей оптимальное отношение $d_3/\sigma \approx 2-4$, для цветных сплавов - 4-5.

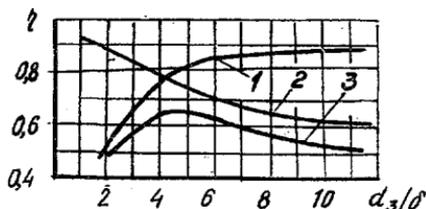


Рис.6. Зависимость η_3 (1), η_T (2) и полезного к.п.д. индуктора (3) от отношения d_3/σ (для стальной заготовки)

По выбранному отношению d_3/σ и заданной величине d_3 определяется ориентировочное значение σ , которое и является исходным параметром для определения частоты тока, соответствующей наиболее высокому значению η :

$$f = \frac{503^2 \rho}{\mu \sigma^2} \quad (\Gamma 4),$$

где ρ выражено в Ом·м; σ - в м; μ - безразмерная величина.

В табл.6 приведены данные ВНИИТВЧ им. Вологодина по выбору частоты тока для сквозного нагрева цилиндрических заготовок

Таблица 6

Частота, Гц	Диаметр заготовки, мм		
	Сталь	Медные сплавы	Алюминиевые сплавы
50	150 и более	100 и более	85 и более
500	70 - 160		
1000	50-120	25 - 100	22 - 85
2500	30-80	18 - 25	15 - 22
8000	15-40	10 - 18	8 - 15
10000 и выше	20 и менее	10 и менее	8 и менее

В диамагнитных и парамагнитных материалах магнитная проницаемость при нагреве практически не изменяется, а следовательно, мало изменяется и глубина проникновения тока. При нагреве заготовок из ферромагнитных материалов до температуры ниже точки Кюри расширяется область возможного применения индукционного нагрева промышленной частотой. Так, для сквозного нагрева заготовок из углеродистых сталей до температуры точки Кюри (700°C) частоту тока сети 50 Гц можно использовать при диаметрах 50 мм и больше. Часто для нагрева ферромагнитных сплавов используют двухчастотный нагрев (до точки Кюри на одной частоте и выше точки Кюри на более высокой частоте).

Не требует особых доказательств целесообразность использования для индукционного нагрева промышленной частоты, поскольку в этом случае отпадает необходимость в дорогостоящих генераторах

(или преобразователях) повышенной частоты, а продолжительность сквозного нагрева при этом минимальна.

Выбор оптимальной частоты должен основываться не только на достижениях наилучших энергетических показателей, но и на комплексном экономическом показателе (с учетом стоимости и эксплуатации преобразователей и других устройств), рис. 7 .

Из графика, например, следует, что, согласно этому показателю, нагрев стальной заготовки диаметром 70мм выгоднее всего производить на частоте 2500 Гц по данным же табл.6 (с точки зрения наиболее выгодного к.п.д.) эта частота может быть 500, 1000 и 2500 Гц.

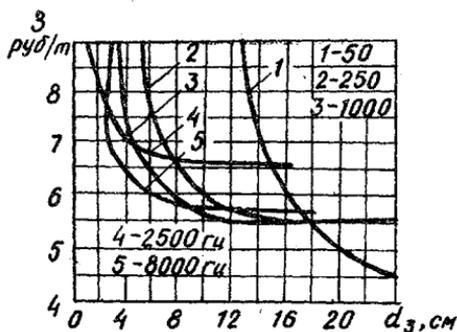


Рис.7. Удельные приведенные затраты при нагреве 1т стальных заготовок различного диаметра при различных частотах

Минимальное время нагрева. Количество одновременно нагреваемых в индукторе заготовок. Выбор частоты тока является необхо-

димым, но не достаточным условием для обеспечения экономичной работы индукционной нагревательной установки. Не менее важным фактором является продолжительность нагрева. С целью повышения термического, а следовательно, и полного к.п.д. продолжительность нагрева следует выбирать наименьшей. Однако установлено, что укорочение цикла нагрева не может производиться в произвольных пределах и лимитируется максимально допустимым перепадом температур между поверхностью и сердцевиной заготовки.

При пластической деформации получение заданного температурного перепада между поверхностью и центром заготовки определяет качество изделий и стойкость инструмента. При обработке заготовок из сталей на прокатных станах и ковочных агрегатах допустимый перепад по температуре поверхности и центра равен 100-150°С. При процессах прессования требования к равномерности нагрева значительно выше и конечный перепад, как правило, не должен пре-

вышать 20-30° для цветных металлов и сплавов и 40-60° - для сталей.

В связи с тем, что нагрев при индукционном методе носит поверхностный характер, скорость выравнивания температуры по сечению зависит от физических свойств металлов, определяемых коэффициентом температуропроводности, а также от применяемых режимов нагрева. Чем жестче требования по равномерности нагрева, тем больше времени затрачивается на его проведение.

Различают два основных режима нагрева. В индукторах с равномерно распределенной удельной мощностью происходит постепенный нагрев заготовок с непрерывным ростом температуры поверхностных и внутренних слоев до получения заданного перепада. Такой режим нагрева получил название обычного, т.е. он чаще всего используется на практике.

В последнее время получил распространение режим изотермического, или ускоренного, нагрева, который производится с постоянной максимальной температурой на поверхности нагреваемой заготовки [1]. В этом случае в первый период нагрева благодаря большой удельной мощности поверхностные слои заготовки нагреваются за короткое время до максимальных температур. В последующий период удельную мощность подбирают такой, чтобы она обеспечила поддержание достигнутой температуры на поверхности, что соответствует режиму термостатирования. Вследствие большого температурного перепада происходит быстрое выравнивание температур и значительное сокращение времени процесса (рис.8). Осуществление такого двухступенчатого процесса возможно за счет изменения режима нагрева параметрическим регулированием (для нагревателей периодического и методического действия). Последнее требует усложнения конструкции и схемы индукционных установок, поэтому подобные установки применяются еще сравнительно редко. Однако преимущества ускоренного нагрева - сокращение времени нагрева вдвое, снижение образования окалины, уменьшение размеров индуктора и др. - делают этот вид нагрева весьма перспективным.

Минимальное время обычного нагрева стальных заготовок при заданном перепаде температур 100°С приведено в табл.7.

Для определения минимально допустимого времени нагрева заготовок из цветных сплавов удобно пользоваться графиком, представленным на рис.9, табл. 8 и 9 или формулой

$$\tau_{min} = \frac{0,17(z_3 - \sigma)^2}{\alpha \left(\frac{t_n}{t_4} - 1 \right)} \text{ сек,} \quad (6)$$

где z_3 - радиус заготовки, см;

σ - глубина проникновения тока, см;

α - средний удельный коэффициент температуропроводности, см²/сек;

t_n и t_3 - соответственно конечные температуры на поверхности и в центре заготовки, °C.

Данные графиков и результаты вычислений по формуле (6)

справедливы для нагрева заготовок токами промышленной частоты, однако могут быть использованы для оценки τ_{min} при нагреве токами повышенной частоты ввиду высокой температуропроводности цветных сплавов.

Оптимальное время ускоренного нагрева заготовок определяется по приближенной формуле

$$\tau_{min} = \frac{z_{np}^2}{\alpha} (0,081 - 0,4 \lg \theta) \text{ сек,}$$

где приведенный радиус заготовки

$$z_{np} = \sqrt{z_3^2 - \sigma \left(z_3 - \frac{\sigma}{3} \right)}, \text{ а } \theta \text{ определяется из выражения } \theta = (t_n - t_4)(t_n - t_{нач}).$$

В приведенных формулах z_3 и σ измеряются см,

$t_n, t_4, t_{нач}$ - °C; α - см²/сек.

Время нагрева заготовки определяется, с одной стороны, минимально допустимым временем τ_{min} , определяющим качество готового изделия, с другой стороны, - интервалом времени, заданным производительностью нагревательного устройства τ_k

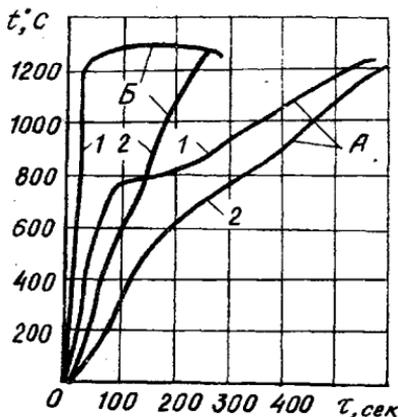


Рис.8. Температурно-временные зависимости при нагреве заготовок диаметром 120 мм с $f = 1000$ Гц при обычном (А) и ускоренном (В) нагреве.

1. Температура поверхности.
2. Температура центра.

Диаметр заготовки, мм	Продолжительность нагрева, мин. при частоте тока, Гц				
	50	500	1000	2500	8000
20	-	-	-	-	0,4
30	-	-	-	0,6	0,8
40	-	-	-	1,0	1,4
50	-	-	1,4	1,6	2,0
60	-	-	2,0	2,3	-
70	-	2,6	2,8	3,0	-
80	-	3,2	3,6	4,0	-
90	-	4,2	4,6	5,0	-
100	-	5,5	6,0	-	-
110	-	7,0	7,5	-	-
120	4,0	8,5	9,0	-	-
150	12,0	14,0	16,0	-	-
175	15,0	18,0	-	-	-
200	20,0	25,0	-	-	-
250	32,0	-	-	-	-

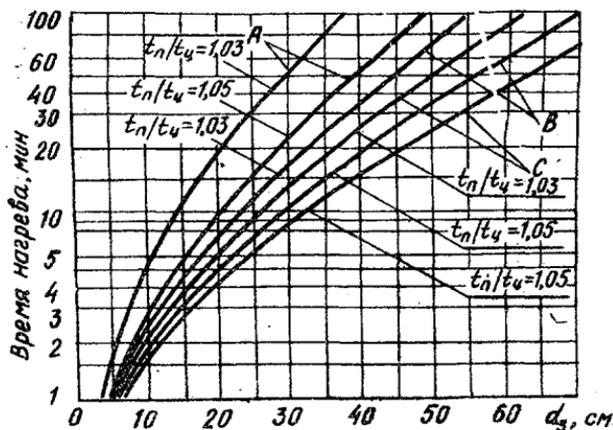


Рис. 9. Зависимость τ_{min} от d_3 и $t_n/t_\gamma = 1,03-1,05$

- A — для латуни
- B — для алюминия
- C — для меди

Если $\tau_{min} > \tau_k$, то в индукторе ведется одновременный нагрев нескольких заготовок

$n = \tau_{min} / \tau_k$
 При $\tau_{min} < \tau_k$ допускается либо увеличение продолжительности нагрева, либо нагрев с паузами, равными $\tau_k - \tau_{min}$
 Однако и первый

Таблица 8

Диаметр алюминиевого слитка, мм.													
Δt	70	100	125	165	195	215	240	300	350	400	500	800	
	Время нагрева до $t_k = 500^\circ\text{C}$, мин.												
20	1,40	3,1	5,10	10,3	15,5	20,0	25,0	40,0	57,5	86,0	122,0	177,0	325,0
40	0,67	1,5	2,44	5,10	7,50	9,50	12,0	19,5	27,5	41,3	58,5	85,0	153,0
60	0,43	0,95	1,55	3,25	4,75	6,00	7,70	12,5	17,5	26,3	37,3	54,0	100,0
80	0,31	0,68	1,2	2,35	3,45	4,35	5,50	8,90	12,6	19,0	27,0	39,0	71,0
100	0,25	0,52	0,85	1,80	2,60	3,30	4,20	6,80	9,60	14,5	20,5	29,5	54,0

Таблица 9

Δt	Диаметр титанового слитка, мм				
	20	40	60	80	100
	Время нагрева		$\partial \partial$	$t_{\kappa} = 980^{\circ}\text{C}$, сек.	
30	35	125	278	660	-
50	20	100	225	500	-
100	12	60	155	300	550
150	10	45	125	225	350

и второй способы приводят к уменьшению к.п.д. нагревательного устройства, которое происходит либо за счет снижения η_r , либо за счет потерь холостого хода двигателя генератора в период пауз.

Геометрические размеры индуктора. Внутренний диаметр спирали индуктора определяется по формуле

$$D_{\text{и}} = d_3 + \Delta\beta + 2\Delta m + 2\Delta_3 + h_n,$$

где $\Delta\beta$ - величина воздушного зазора между заготовкой и тепловой изоляцией;

Δm - толщина тепловой изоляции;

Δ_3 - толщина электрической изоляции;

h_n - высота направляющих для перемещения заготовки в индукторе.

Величина воздушного зазора и толщина тепловой изоляции в значительной степени влияют на электрический к.п.д. нагревательного устройства. С увеличением воздушного зазора и толщины тепловой изоляции электрический к.п.д. резко падает. В то же время уменьшение толщины тепловой изоляции приводит к перегреву индуктора и уменьшению термического к.п.д. (табл.10).

Таблица 10

Зависимость предельного к.п.д. индуктора от относительной величины зазора

0	0,025	0,05	0,075	0,1	0,125	0,15	0,175	0,2	0,3	0,4	0,5
0,88	0,87	0,86	0,85	0,85	0,84	0,84	0,83	0,83	0,81	0,79	0,77

Из таблицы видно, что если у детали $\varnothing 100$ мм зазор 10 мм уменьшит к.п.д. по сравнению с предельным только на 2%, то у детали $\varnothing 20$ мм зазор 10 мм уменьшит к.п.д. на 10%. Так как к.п.д. обычно бывает меньше предельного, то фактическое влияние зазора еще ощутимее, чем дается в табл.8. Поэтому, особенно при малых диаметрах детали, надо стремиться к уменьшению зазора. Кроме того, увеличение зазора ведет к уменьшению $\cos \varphi$, снижающего к.п.д. трансформатора, а главное - увеличивает мощность конденсаторной батареи и тем самым удорожает стоимость установки.

Практикой эксплуатации индукционных нагревателей установлено, что наиболее выгодное соотношение между электрическим и термическим к.п.д. имеет место при толщине слоя тепловой изоляции 10-25 мм (коэффициент теплопроводности изоляционного материала должен быть при этом равным 0,5 - 1 ккал/м.ч. $^{\circ}$ C).

Слой толщиной 25 мм обычно применяется в индукторах, предназначенных для нагрева заготовок диаметром более 50 мм. При нагреве заготовок диаметром менее 50 мм допускается уменьшение слоя тепловой изоляции до 15 и даже 10 мм.

Величина воздушного зазора $\Delta \delta$ должна быть не менее 2 мм. При меньшем воздушном зазоре возможны механические повреждения тепловой изоляции индуктора.

Толщина электрической изоляции при расчете принимается равной 2 мм (толщина миканитовой гильзы).

Высота направляющих, используемых для защиты тепловой изоляции от механических повреждений, обычно не превышает 4-6 мм.

Длина индуктора зависит от назначения нагревательного устройства и определяется размером заготовок, временем их нагрева и производительностью деформирующего механизма.

При расчете индуктора периодического действия длина его определяется по формуле

$$l_u = l_3 + \Delta l;$$

методического действия -

$$l_u = \pi l_3 + \Delta l;$$

непрерывного действия -

$$l_u = v t + \Delta l,$$

где v - скорость перемещения заготовки в индукторе.

В приведенных формулах величина Δl учитывает влияние краевого эффекта и обычно принимается равной 1-2 диаметрам индуктора.

Электрический расчет индуктора. Электрический расчет индуктора заключается в определении числа витков и размеров индуктирующей трубки, реактивной мощности и количества банок конденсаторной батареи.

Расчет ведут на горячий режим работы индуктора. Обычно вначале рассчитывают одновитковый индуктор, а в дальнейшем по напряжению на индукторе находят число его витков.

Число витков индуктора определяется по формуле

$$\omega = (U/Z') \sqrt{R_3' / P_u^*}, \quad (7)$$

где U - напряжение генератора или питающей сети;

Z' - полное сопротивление индуктора, отнесенное к одному витку;

R_3' - эквивалентное активное сопротивление индуктора, отнесенное к одному витку;

P_u^* - электрическая мощность, подводимая к индуктору, равная при однофазном исполнении печи ее полной мощности P_u , при трехфазном - $P_u/3$. В последнем случае формула (7) определяет число витков, приходящееся на одну фазу.

Полное сопротивление индуктора Z' может быть найдено из выражения

$$Z' = \sqrt{(R_3')^2 + (X_3')^2}, \quad (8)$$

где X_3' - реактивное сопротивление индуктора.

В свою очередь, R_3' и X_3' могут быть представлены в виде равенств

$$R_3' = R_1 + R_2 \quad \text{и} \quad X_3' = X_1 - X_2, \quad (9)$$

где R_1 и X_1 - активное и реактивное сопротивление индуктора,

R_2 и X_2 - активное и реактивное сопротивление индуктора, вносимое нагреваемой заготовкой.

Величины R_1 , X_1 , R_2 и X_2 определяются по формулам:

$$R_1 = \rho \pi D_u / \ell_u \sigma_1;$$

$$X_1 = 6,2 \cdot 10^{-8} f k_1 D_u^2 / \ell_u;$$

$$R_2 = 6,2 \cdot 10^{-8} f d_3^2 A_B / n \ell_3; \quad (10)$$

$$X_2 = 6,2 \cdot 10^{-8} f d_3^2 (1-B) k_2 / n \ell_3,$$

- где ρ_1 - удельное электрическое сопротивление материала спирали индуктора;
 σ_1 - глубина проникновения тока в материал спирали индуктора;
 k_1, k_2 и β - коэффициенты, вносящие поправки при вычислении составляющих сопротивления индуктора.

При $l_u/\Delta u > 5$ коэффициенты k_1, k_2 и β принимаются равными единице. При $l_u/\Delta u < 5$ коэффициенты k_1, k_2 и β могут приближенно определяться по эмпирическим формулам:

$$k_1 = 0,97 - 0,29 (\Delta u / l_u);$$

$$k_2 = 0,97 - 0,29 (d_3 / l_3);$$

$$\beta = k_m^2 (1 + A^2) (k_2^2 + A^2).$$

Коэффициенты А и В являются функциями отношения диаметра заготовки к глубине проникновения в нее тока (рис.10). Значения коэффициента $k_m = f(\Delta u / l_u \text{ и } l_u / l_3)$ определяются из графика, приведенного на рис.11.

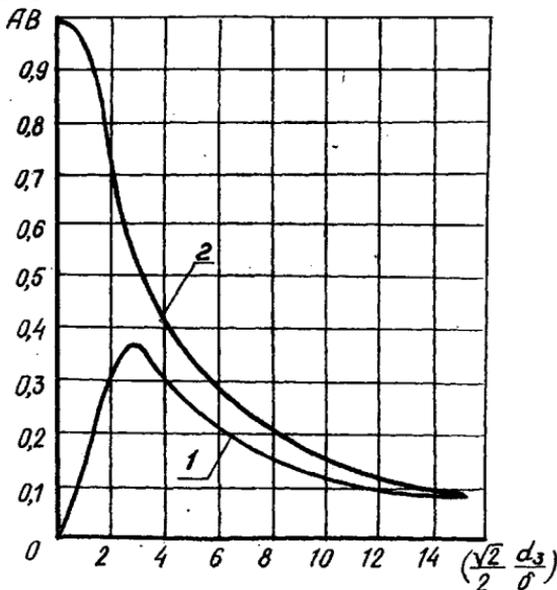


Рис.10. Графики функций А(кривая 1) и В (кривая 2)

Электрическая мощность P_u , подводимая к индуктору, определяется из соотношения

$$P_u = P_3 / \eta_3 \eta_T, \quad (11)$$

где P_3 - полезная мощность, необходимая для нагрева заготовок до заданной температуры.

Полезная мощность P_3 находится по формуле

$$P_3 = \frac{c(t_k - t_{нач})G_n}{0,24\tau} \text{ кВт,}$$

где C - теплоемкость нагреваемой заготовки, ккал/кг. $^{\circ}$ C;
 t_x и $t_{нач}$ - соответственно заданная и исходная температура
 нагрева заготовки, $^{\circ}$ C;
 G - масса одной нагреваемой заготовки, кг.

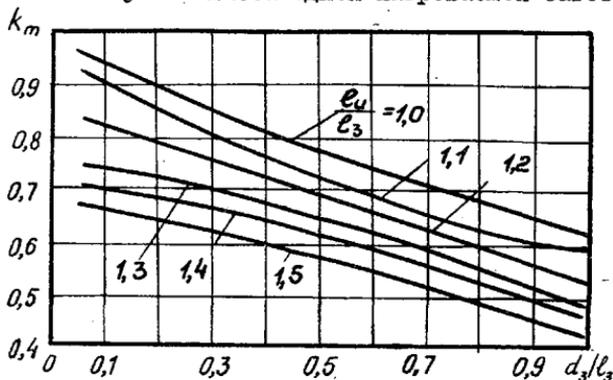


Рис. II. График для нахождения поправочного коэффициента k_m

Электрический к.п.д. определяется отношением $\eta_3 = R_2/R_3$, термический - $\eta_T = P_3/(P_3 + P_{\phi})$, где P_{ϕ} - электрическая мощность, требуемая для компенсации тепловых потерь через футеровку,

$$P_{\phi} = \frac{2\pi l_{\phi} \lambda (t_2 - t_1)}{860 l_n (D_{\phi_1} / D_{\phi_2})} \quad \text{кВт.} \quad (13)$$

В выражении (13) l_{ϕ} - длина футеровки в м, равная длине индуктора l_u ; λ - коэффициент теплопроводности футеровки, D_{ϕ_1} и D_{ϕ_2} - наружный и внутренний диаметры футеровки (при расчете обычно принимают $D_{\phi_1} = D_u$, а $D_{\phi_2} = d_3$), t_1 и t_2 - температура наружной и внутренней поверхностей футеровки ($t_2 = t_x$, а $t_1 = 60^{\circ}$).

При определении размеров трубки спирали индуктора рассчитываются: ширина трубки b , толщина стенки трубки $\Delta_{тр}$, площадь отверстия трубки S и высота трубки $h_{тр}$.

Ширина трубки индуктора b определяется по формуле

$$b = l^* k_3 / (\omega + 1) \quad \text{мм,} \quad (14)$$

где $l^* = l_u$ при однофазном исполнении индуктора и

$l^* = l_u/3$ при трехфазном;

k_3 - коэффициент заполнения, учитывающий наличие изоляции между витками.

Чем больше межвитковое расстояние, тем меньше полезная высота индуктора и его к.п.д. Поэтому расстояние между витками

Это объясняется сложностью технологического изготовления спирали из толстостенной трубки. Снижение к.п.д. при этом частично компенсируется уменьшенным расходом меди.

Уменьшение толщины стенки индуктирующего провода приводит к изменению теплового режима индуктора, т.е. уменьшение активной площади повышает сопротивление и вызывает чрезмерный нагрев спирали.

Нагрев спирали индуктора контролируется по максимально допустимой плотности тока

$$i = J/F,$$

где J - ток индуктора в амперах, равный $U/\omega^2 Z'$;
 F - активная площадь сечения спирали.

При $\Delta_{тр} > \delta$ $F = \delta^2$, при $\Delta_{тр} < \delta$ $F = \Delta_{тр} \delta$. Принятие в расчет активной площади только нижней полки спирали обусловлено влиянием поверхностного; кольцевого эффекта и эффекта близости.

Из практики установлено, что при водяном охлаждении значение i не должно превышать 150 А/мм^2 (в противном случае необходимо увеличить значения δ или $\Delta_{тр}$).

Высота трубки индуктора $h_{мп}$ (радиальный размер) определяется по формуле

$$h_{мп} = \frac{S}{\delta - 2\Delta_{тр}} + 2\Delta_{тр} ,$$

где S - площадь внутреннего окна трубки, рассчитываемая из условий достаточного охлаждения меди индуктора:

$$S = \frac{P_u (1 - \eta_{э} 2\tau)}{4,18 v^* (t_{г} - t_{у})} .$$

Здесь P_u - мощность, подводимая к индуктору, Вт;

v^* - скорость движения воды в спирали индуктора, м/сек
(в случае использования для охлаждения индуктора воды из водопроводной сети v^* принимается равной $1 - 1,5$ м/сек);

$t_{г}$ и $t_{у}$ - соответственно температура входящей и уходящей из индуктора воды (обычно принимается $t_{г} = 15 - 20^{\circ}\text{C}$,
 $t_{у} = 60^{\circ}\text{C}$).

Если в результате расчета получится, что высота трубки в $1,5 - 2$ раза больше ее ширины, целесообразно переходить к использованию нескольких ветвей охлаждения, соответственно уменьшая при этом высоту трубки до $(1,5 - 2) \delta$. Последнее объясняется

сложностью технологической навивки спирали с $h_{гр} > (1,5 - 2) \delta$ вследствие потери трубкой радиальной устойчивости.

Коэффициент мощности системы индуктор-заготовка и реактивная мощность конденсаторной батареи

Индукторы установок имеют низкий естественный коэффициент мощности, причем значения его изменяются в довольно широких пределах в зависимости от частоты тока, зазоров между индуктором и заготовкой, магнитной проницаемости, удельного сопротивления и размеров нагреваемых изделий.

Зависимость коэффициента мощности от частоты тока и диаметра нагреваемых изделий позволит производить правильный выбор реактивной мощности компенсирующей конденсаторной батареи, руководствуясь не только минимальным расходом электроэнергии, но и снижением стоимости установки и необходимых производственных площадей.

На рис.12 и 13 для примера показаны зависимости коэффициента мощности $\cos \varphi$ от частоты, диаметра d_3 и магнитной проницаемости заготовки.

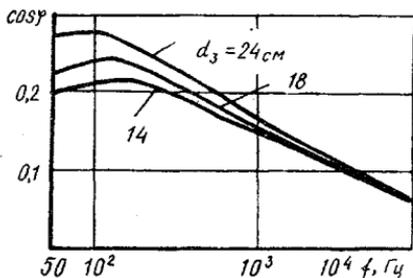


Рис.12. Зависимость $\cos \varphi$ от f и d_3 при $\mu = 1$

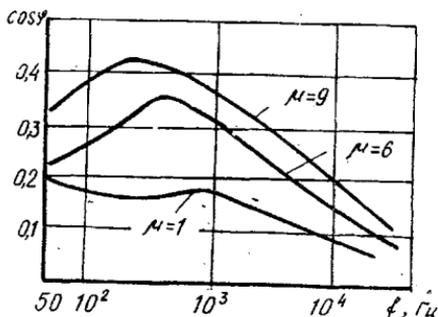


Рис.13. Зависимость $\cos \varphi$ от f и μ при $d_3 = 6$ см

При нагреве металлов с малым удельным сопротивлением (алюминий, медь, бронза и т.д.) $\cos \varphi$ значительно ниже, чем при нагреве черных металлов.

На значение $\cos \varphi$ особенно большое влияние оказывает величина зазора между индуктором и заготовкой (рис.14).

Теоретически предельная величина $\cos \varphi$ при отсутствии зазора между индуктором и заготовкой равна 0,707.

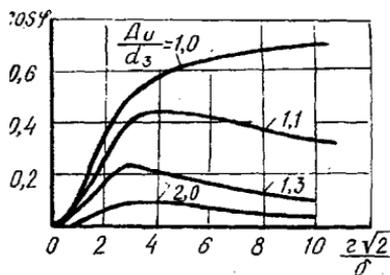


Рис.14. $\cos \varphi$ в зависимости от аргумента $\sqrt{2} z / \sigma$ и отношения $\Delta u / d_3$

сбраемого по справочникам и таблицам (например, табл.12).

Значение коэффициента мощности $\cos \varphi$ может быть определено из выражения

$$\cos \varphi = R_3 / Z_3$$

Реактивная мощность конденсаторной батареи

$$P_c = P_U / \cos \varphi, \text{ кВА}$$

Число банок конденсаторной батареи находится из соотношения

$$n_c = P_c / P_c^*$$

где P_c^* - реактивная мощность одной банки конденсатора, под-

Таблица 12.

Тип конденсатора	Емкость, мкФ	Реактивная мощность, кВА	Частота тока, Гц	Рабочее напряжение, В	Вес, кг	Габариты, мм
ПМВ - 1 - 1	11,2	70	1000	1000	23	360 x x140 x x190
ПМВ - 3 - 1	1,28	70	1000	3000	23	
ПМВ-2,4 - 2	0,98	70	2000	2400	23	
ПМВ-1,5 - 2	3,0	84	2000	1500	23	
ПМВ-0,66-2,5	8,8	70	2500	600	23	
ПМВ-0,4/0,8-8	16,0	120	8000	400/800	24,5	

Возможно использование приведенных конденсаторов при меньших частотах и напряжениях .

7. Расчет системы охлаждения индуктора

Нагрев индуктора обуславливается электрическими и тепловыми потерями в нем, вызываемыми тепловым потоком от заготовки к индуктору.

Полные потери, которые должны быть удалены водой, охлаждающей индуктор, равны сумме электрических и тепловых потерь и могут быть определены по формуле

$$P_{пот} = P_U (1 - \eta_1 \eta_r)$$

Прежде чем перейти к расчету системы охлаждения, необходимо отметить, что из условия техники безопасности температура воды t_y на выходе из индуктора не должна превышать 60°C .

Потребное количество воды

$$Q = \frac{P_{nom} 10^{-3}}{t_y - t_{\text{вх}}} \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (15)$$

где $t_{\text{вх}}$ - температура входящей в индуктор охлаждающей воды.

Необходимо удостовериться, что условия теплопередачи обеспечивают отвод от индуктора всего тепла потерь P_{nom} . Количество тепла, отводимого водой от индуктора, определяется выражением

$$P_{omb} = \alpha F_{охл} (t_{mp} - t_{\text{ср}}) \text{ ккал/ч}, \quad (16)$$

где α - коэффициент теплоотдачи, $\text{ккал/м}^2 \cdot \text{град} \cdot \text{ч}$;

$F_{охл}$ - поверхность теплоотдачи индуктора, м^2 ;

t_{mp} - температура трубки индуктора, $^\circ\text{C}$; обычно $t_{mp} < 60^\circ\text{C}$
(лучше не превышать $t_{mp} \approx 50^\circ\text{C}$);

$t_{\text{ср}}$ - средняя температура охлаждающей воды, $^\circ\text{C}$.

Коэффициент теплоотдачи α зависит от характера движения охлаждающей воды, который определяется числом Рейнольдса, вычисляемым по формуле

$$Re = \frac{v^* d_{\text{экв}}}{\nu_{\text{в}}}, \quad (17)$$

где v^* - скорость движения охлаждающей воды, м/сек ;

$d_{\text{экв}}$ - эквивалентный внутренний диаметр трубки индуктора, м ;

$\nu_{\text{в}}$ - коэффициент кинематической вязкости воды, $\text{м}^2/\text{сек}$.

Если $Re < 2200$ - движение ламинарное; если $Re > 10000$ - движение турбулентное; если $2200 < Re < 10000$ - движение имеет смешанный характер.

При турбулентном течении вода перемешивается, что обеспечивает полный нагрев всего объема воды, протекающего через индуктор. При ламинарном течении вода движется через индуктор без перемешивания, и нагрев тех частиц ее, которые не соприкасаются со стенками индуктора, происходит лишь теплопроводностью и конвекцией, т.е. передача тепла от индуктора охлаждающей воде при ламинарном движении значительно меньше, чем при турбулентном, и может не обеспечить отвод всех потерь от индуктора. Поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать лишь турбулентное и смешанное движение.

Скорость движения воды v^* легко получить из выражения

$$v^* = \frac{Q 10^{-3}}{3,6 d_{экв}} \quad \text{м/сек.} \quad (18)$$

где Q - расход воды, м³/ч;

$d_{экв}$ - площадь поперечного сечения отверстия трубки индуктора, м².

Скорость воды при определенном расходе воды Q , м³/ч, зависит от числа секций охлаждения индуктора $n_{секц}$.

Очевидно

$$v^* = \frac{Q 10^{-3}}{3,6 d_{экв} n_{секц}} \quad \text{м/сек.} \quad (19)$$

Ориентировочно можно определить количество секций охлаждения по скорости воды: как показывает практика, при скорости воды больше 1,5 м/сек потеря напора в индукторе превышает допустимую, поэтому ориентировочно количество секций охлаждения

$$n_{секц} \approx \frac{v^*}{1,5} \quad (20)$$

Величина эквивалентного диаметра $d_{экв}$ в (17) определяется по площади S и периметру π отверстия трубки индуктора

$$d_{экв} = 4S/\pi \quad \text{м.} \quad (21)$$

Коэффициент кинематической вязкости ν_δ берется из таблиц для воды при средней температуре

$$t_{\delta_{ср}} = \frac{t_\delta + t_\gamma}{2}$$

Значения некоторых физических параметров воды при различных температурах приведены в табл. 13, где λ_δ - коэффициент теплопроводности воды при средней температуре воды $t_{\delta_{ср}}$, ккал/м·ч·град;

ν_δ - кинематическая вязкость воды при средней температуре воды, м²/сек; a_δ - коэффициент температуропроводности воды при средней температуре ее, м²/ч; $P_\delta = \nu_\delta / a_\delta$ - критерий Прандтля.

Выражение коэффициента теплоотдачи в формуле (16) зависит от характера движения:

а) при турбулентном движении

$$\alpha = 0,023 \left(1 + 3,54 \frac{d_{экв}}{D_u + d_{экв}} \right) \frac{\lambda_\delta}{d_{экв}} \left(\frac{3600 \nu_\delta}{a_\delta} \right)^{0,43} \left(\frac{v^* d_{экв}}{\nu_\delta} \right)^{0,8} \quad \text{ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град} \quad (22)$$

Таблица 13

$t_{вод}, ^\circ\text{C}$	$\lambda_{\delta}, \frac{\text{ккал}}{\text{м}\cdot\text{ч}\cdot\text{град}}$	$\nu_{\delta}, \text{м}^2/\text{сек}$	$\alpha_{\delta}, \text{м}^2/\text{ч}$	ρ_2
0	0,474	$1,790 \cdot 10^{-6}$	$4,7 \cdot 10^{-4}$	13,7
10	0,434	$1,300 \cdot 10^{-6}$	$4,9 \cdot 10^{-4}$	9,56
20	0,515	$1,000 \cdot 10^{-6}$	$5,1 \cdot 10^{-4}$	7,06
30	0,531	$8,05 \cdot 10^{-7}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$	5,50
40	0,545	$6,59 \cdot 10^{-7}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	4,30
50	0,557	$5,66 \cdot 10^{-7}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$	3,56
60	0,567	$5,79 \cdot 10^{-7}$	$5,8 \cdot 10^{-4}$	3,00
70	0,574	$4,15 \cdot 10^{-7}$	$5,8 \cdot 10^{-4}$	2,56
80	0,580	$3,66 \cdot 10^{-7}$	$5,9 \cdot 10^{-4}$	2,23
90	0,585	$3,26 \cdot 10^{-7}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	1,95

б) если движение имеет смешанный характер (при $2200 < Re < 10000$), выражение для α можно получить из критерия Нуссельта (Nu):

$$\alpha = (Nu) \frac{\lambda_{\delta}}{d_{экв}} \quad \text{ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}. \quad (23)$$

Величину Nu в этом режиме следует находить по формуле

$$Nu = K_0 (\rho_{2g})^{0,43} \left(\frac{\rho_{2g}}{\rho_{2u}} \right), \quad (24)$$

где ρ_{2u} - критерий Прондстеля при средней температуре стенок индуктора (50°C).

Функция $K_0 = f(Re)$ известна из экспериментов [13].

График этой функции дан на рис. 15. Вычислив или взяв из вышеприведенной табл.13 значения ρ_{2g} и ρ_{2u} , легко найти, используя рис.15, величину Nu и по формуле (24) - величину α для смешанного режима.

Поверхность охлаждения $F_{охл}$, входящая в выражение (16), является частью внутренней поверхности трубки индуктора, так как ток циркулирует не по всей трубке, а только по той ее части, которая обращена к заготовке. Поэтому поверхностью охлаждения $F_{охл}$ следует считать не более 0,40-0,45 внутренней поверхности трубки:

$$F_{охл} = (0,4-0,45) \pi d_{экв} \pi D_u \omega$$

или

$$F_{охл} = 4d_{экв} D_u \omega. \quad (25)$$

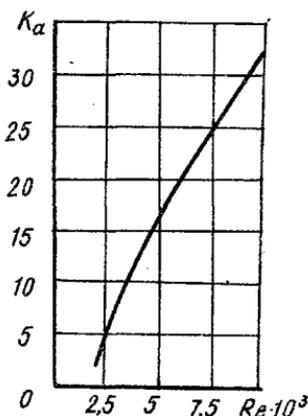


Рис.15. График функции $K_a = f(Re)$ для нахождения критерия Нуссельта при смешанном движении

Теперь есть все данные для вычисления по формуле (16) количества теплоты $P_{отв}$, которое можно фактически отвести от индуктора и которое должно быть больше мощности потерь $P_{пот}$.

Если $P_{отв} < P_{пот}$, то необходимо увеличить количество охлаждающей воды, протекающей через индуктор, и повторить расчет. Увеличить количество протекающей воды можно наращиванием скорости воды v^* . Однако для увеличения скорости воды необходимо повысить давление воды на входе в индуктор, которое растет пропорционально квадрату скорости v^* (18). Если охлаждающая вода

поступает из водопроводной магистрали, избыточное давление в которой обычно имеет величину не больше 3-4 ат, то перепад давлений ΔH_u на входе и на выходе индуктора не должен превышать 2 ат или 20 м вод.ст. Это требование заставляет увеличивать количество параллельных ветвей (секций) охлаждения индуктора.

При применении замкнутой системы водяного охлаждения вода специальным насосом прогоняется через охладитель и снова проходит через индуктор; так как давление в охлаждающем контуре создается отдельным насосом, величина ΔH_u не ограничивается.

Перепад давления при турбулентном движении

$$\Delta H_u = (\xi k_w \frac{\pi D_u}{d_{эжв}} + \eta_{пов}) \omega \frac{(v^*)^2}{2g} \text{ м}, \quad (26)$$

где ξ - коэффициент трения, зависящий от числа Рейнольдса;

k_w - коэффициент увеличения сопротивления, вызванный шероховатостью внутренней поверхности трубки;

$\eta_{пов}$ - коэффициент сопротивления поворота;

$g = 9,81$ м/сек - ускорение силы тяжести.

Коэффициент трения ξ для гладких труб находится по формулам: Блазиуса при $2000 < Re < 100000$

$$\xi = \frac{0,316}{(Re)^{0,25}}; \quad (27)$$

Никурадзе при $100000 < Re < 3000000$

$$\xi = 0,0032 + \frac{0,221}{(Re)^{0,237}}. \quad (28)$$

Коэффициент k_w учитывает то обстоятельство, что в действительности внутренняя поверхность трубки не является вполне гладкой вследствие отложения на ее стенках накипи и солей, а также неровностей и вмятин, возникающих при изготовлении индуктора, наличия сварных швов и т.д. Как показывает практика [13], коэффициент трения в процессе эксплуатации увеличивается в 1,5-2 раза. Кроме того, вследствие неровностей, возникших при изготовлении индуктора, а также в гибких штангах и стыках, коэффициент трения возрастает еще на 20-25%. Таким образом, коэффициент k_w , который должен учитывать эти факторы, можно принять равным 1,8 - 2,5.

Коэффициент сопротивления поворота струи $\varphi_{пов}$ для разных величин Re и $D_u/d_{экв}$ приведен в табл.14.

Таблица 14

$D_u/d_{экв}$	Число Рейнольдса					
	3000	10000	50000	100000	250000	500000
8	0,400	0,270	0,184	0,161	0,1393	0,1273
10	0,391	0,264	0,180	0,1573	0,1362	0,1246
12	0,344	0,218	0,1485	0,1298	0,1124	0,1030
15	0,294	0,198	0,1350	0,1180	0,1024	$9,36 \cdot 10^{-2}$
20	0,254	0,1715	0,1170	0,1023	$8,85 \cdot 10^{-2}$	$8,12 \cdot 10^{-2}$
25	0,205	0,1385	$9,45 \cdot 10^{-2}$	$8,25 \cdot 10^{-2}$	$7,15 \cdot 10^{-2}$	$6,54 \cdot 10^{-2}$
30	0,1715	0,1158	$7,89 \cdot 10^{-2}$	$6,90 \cdot 10^{-2}$	$5,97 \cdot 10^{-2}$	$5,46 \cdot 10^{-2}$
40	0,1435	$9,68 \cdot 10^{-2}$	$6,60 \cdot 10^{-2}$	$5,77 \cdot 10^{-2}$	$5,00 \cdot 10^{-2}$	$4,57 \cdot 10^{-2}$
50	$9,80 \cdot 10^{-2}$	$6,61 \cdot 10^{-2}$	$4,51 \cdot 10^{-2}$	$3,94 \cdot 10^{-2}$	$3,42 \cdot 10^{-2}$	$3,19 \cdot 10^{-2}$

Необходимое число $n_{секц}$ охлаждающих ветвей (секций) индуктора определится после вычисления δH_u . Если охлаждающая вода поступает в индуктор из водопроводной магистрали, эта величина, как

указывалось ранее, не должна превосходить 20 м вод.ст.; если же δH_U превышает 20 м вод.ст., следует уменьшить ее либо путем увеличения сечения трубки $d_{экв}$ (чтобы снизить скорость воды v^* и тем самым уменьшить перепад давлений), либо увеличить число секций системы охлаждения индуктора по сравнению с принятым предварительно по формуле (20), что уменьшит потребное количество охлаждающей воды в каждой секции, а следовательно, и скорость v^* (пропорциональную числу секций $n_{секц}$) и перепад давлений δH_U .

Так как увеличение сечения трубки (т.е. увеличение $d_{экв}$) возможно в сравнительно узких пределах, то этот способ можно применить только в тех случаях, если перепад давлений незначительно превосходит 20 м вод.ст. Если же δH_U значительно больше этой величины, следует увеличить число секций системы охлаждения.

8. Порядок расчета индукционной печи

1. Определить оптимальную частоту тока.
2. Вычислить минимальное время нагрева; темп подачи заготовок; количество одновременно нагреваемых заготовок; длину и диаметр индуктора; полезную мощность печи.
3. Выбрать тепловую и электрическую изоляцию печи, найти их теплофизические характеристики.
4. Рассчитать электрический, термический и полный к.п.д.; полную мощность печи.
5. Установить тип преобразователя частоты, его рабочее напряжение, характер подключения к нему печи.
6. Определить число витков индуктора.
7. Выявить необходимость электрического секционирования индуктора, подключение симметрирующих устройств, понижающего трансформатора.
8. Найти геометрические размеры трубки индуктора, скорректировать их по размерам, выпускаемым промышленностью.
9. Рассчитать коэффициент мощности печи; мощность конденсаторной батареи; количество банок конденсаторов.
10. Проверить возможность использования трубки индуктора с точки зрения режима ее охлаждения, для чего рассчитать:

Объем 6 и 7 разд. 10 - 12 с.

Окончание расчета индуктора и его системы охлаждения соответствует 50% выполнения общего объема курсового проекта.

9. Описание конструкции индукционной печи

В результате расчета индуктора получены исходные данные для проектирования индукционного нагревательного устройства, которое состоит из:

индуктора, в котором осуществляется преобразование энергии электромагнитного поля в тепловую энергию заготовки;
конденсаторной батареи, служащей для компенсации обычно низкого коэффициента мощности индуктора;

системы распределения воды для охлаждения индуктора, шин и конденсаторов;

приборов для управления процессом нагрева и регулирования его;

механизмов подачи заготовок в индуктор и извлечения их;
электроизмерительных приборов для наблюдения за процессом нагрева;

различных реле, образующих схему автоматического управления нагревом и подачей заготовок.

Вышеперечисленные оборудование и аппаратура собираются в металлическом корпусе в один агрегат.

Компоновка агрегата произвольная, но должна удовлетворять требованиям:

удобства в работе и взаимосвязи с основным **деформирующим** оборудованием;

техники безопасности;

максимального использования производственных площадей;

удобства проведения ремонтных работ.

Конструкция и габаритные размеры отдельных элементов индукционного агрегата приведены в работах [2], [4], [24].

Найденное компоновочное решение должно найти отражение в графической части проекта (две проекции общего вида нагревательного устройства с проставлением габаритных размеров, привязкой к фундаменту и составлением классификатора входящих узлов и деталей) и в **пояснительной** записке с описанием компоновочной схемы.

Описание конструкции индуктора должно быть конкретным и соответствовать выполненной графической части. Кроме описания, эта

часть проекта должна включать обоснование того или иного конструктивного решения (например, выбор материала направляющих, их крепления, необходимость охлаждения, применение магнитного экрана и т.д.).

Примеры различных конструктивных решений индукторов даны в литературе [2], [4], [24],

Объем разд. 2 - 3 с.

10. Мероприятия по обеспечению техники безопасности при работе индукционной печи

Мероприятия по обеспечению техники безопасности разрабатываются на всех этапах создания нагревательного устройства: при расчете и проектировании индуктора (назначение температуры наружной стенки, постановка магнитного экрана и др.), при выполнении компоновочной схемы, схемы автоматики управления работой печи.

В этом разделе пояснительной записки они должны быть собраны в единый комплекс. Следует обратить внимание на:

требования к помещениям, в которых располагаются нагревательные устройства;

наличие механических, электрических и других видов блокировок; наличие ограждений;

правила электропроводки токов повышенной частоты;

наличие заземления у всех металлических узлов, в том числе и системы охлаждения;

правила ремонта электротехнических установок;

освещение и вентиляцию рабочего места.

Все нагревательные установки должны удовлетворять требованиям, изложенным в правилах по технике безопасности: "Устройство электроустановок", "Техническая эксплуатация электроустановок промышленных предприятий", "Техника безопасности при эксплуатации электротехнических установок промышленных предприятий".

Высокочастотные установки, кроме того, должны соответствовать требованиям правил по технике безопасности и промышленной санитарии при работе на высокочастотных установках.

Объем разд. 1,5 - 2с. Литература: [25].

Законченная графическая часть проекта и оформление разделов 8 и 9 пояснительной записки соответствует выполнению 80% общего объема курсового проекта.

II. Спецтема проекта

Спецтема проекта предусматривает углубленную разработку отдельных вопросов расчета или проектирования индукционной печи, например, дополнительно требуется:

провести анализ факторов, влияющих на неравномерность индукционного нагрева заготовок;

выполнить технико-экономическое сравнение обычного и ускоренного методов индукционного нагрева;

разработать механизм загрузки и выгрузки нагреваемых в индукционной печи заготовок;

разработать электросхему автоматического управления работой индукционной печи;

провести техническое сравнение новейших марок теплоизоляционных материалов;

осветить особенности конструкции индукторов для нагрева тел сложной формы.

Спецтема проекта предусматривает самостоятельную работу студентов с научно-технической литературой, умение выбрать и проанализировать материал, относящийся к вопросам задания, проявить интерес к самостоятельной конструкторской работе.

Описание спецтемы проекта должно занимать 5-10 с.

Графическая часть проекта

На первом листе формата А1 дается общий вид индуктора с необходимыми видами, разрезами и сечениями.

На втором листе такого же формата должны быть представлены две проекции общего вида нагревательного устройства. Кроме компоновочной схемы, на этом же листе должна быть изображена принципиальная электрическая схема нагревательного устройства.

На третьем листе представляется детализовка отдельных узлов индуктора и графическая часть спецтемы проекта.

В некоторых случаях разрешается совмещение компоновочной схемы нагревательного устройства с графической частью спецтемы. Например, спроектированный механизм загрузки и выгрузки заготовок может быть отражен на компоновочной схеме; схема автоматического управления работой печи - совмещена с ее принципиальной электрической схемой и т.д.

Л и т е р а т у р а

1. Телегин А.С. Теллотехнические расчеты металлургических печей. М., "Металлургия", 1970.
2. Касенков М.А. Нагревательные устройства кузнечного производства. М., Машгиз, 1962.
3. Бабат Г.И. Индукционный нагрев металлов. Л. "Энергия", 1965.
4. Беляев Н.В. Практика индукционного нагрева в кузнечном производстве, М., Машгиз, 1963.
5. Родыгин Н.М. Индукционный нагрев стальных изделий. Металлургиздат, 1950.
6. Кудрявцев И.В. Металлы в машиностроении. М., "Машиностроение", 1967.
7. Третьяков А.В., Эозин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. "Металлургия", 1973.
8. Келоглу Ю.П. и др. Краткий металлургический справочник. Кишинев, 1969.
9. Справочник по обработке цветных металлов и сплавов. Под ред. П.Е. Миллера. М, Металлургиздат, 1961.
10. Жолобов В.В., Зверев Г.И. Прессование металлов. "Металлургия", 1971.
11. Зайков М.А. Режимы деформации и усилия при горячей прокатке. Металлургиздат, 1960.
12. Днестровский Н.З., Померанцев С.Н. Краткий справочник по обработке цветных металлов и сплавов. Металлургиздат, 1958.
13. Вайнберг А.М. Индукционные плавильные печи. М., "Энергия", 1967.
14. Жетерин Р.П., Спицын М.А. Машинные генераторы. Машгиз, 1957.
15. Шаров В.С. Электромашинные индукторные генераторы. Госэнергоиздат, 1961.
16. Жетерин Р.П., Спицын М.А. Машинные генераторы. Машгиз, 1957.
17. Простяков А.А. Индукционные нагревательные установки. "Энергия", 1970.
18. Донской А.В., Ивенский Г.В. Электрические установки с ионными преобразователями частоты. М., "Энергия", 1964.

19. Коффе Г.С. и др. Потери и к.п.д. преобразователя частоты на тиристорах. "Электротермия", 1967; вып.56.
20. Коффе М.С., Фаворин В.А. Особенности работы тиристорov в преобразователях повышенной частоты. "Электротермия", 1966, вып.54.
21. Донской А.В., Рама Г.С., Вигдорович Ю.Б. Высокочастотные электротермические установки с ламповыми генераторами. Госэнергоиздат, 1956.
22. Иванов В.А., Изаков Ф.А. Пути повышения к.п.д. установок индукционного нагрева. Госэнергоиздат, 1961.
23. Эрман А.Э., Чайкин П.М., Простяков А.А., Промышленные симметрирующие устройства для индукционных нагревательных установок, "Электротермия", 1967, вып.58.
24. Богданов В.Н., Рыскин С.Е., Шамов А.Н. Индукционный нагрев в кузнечном производстве. Машгиз, 1956.
25. Злотников С.М., Казакевич П.И., Михайлова В.П. Техника безопасности и промышленная санитария в кузнечно-прессовых цехах. "Машиностроение", 1974.
26. Слохоцкий А.Е., Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева машиностроительных деталей. Машгиз, 1954.
27. Фарман С.А., Колобнев И.Ф. Индукционные печи. Metallurgizdat, 1958.
28. Трофимов И.Д., Стоколов В.Е. Оборудование для горячей штамповки с электронагревом. "Машиностроение", 1972.
29. Шамов А.Н., Бодажков В.А. Проектирование и эксплуатация высокочастотных установок. "Машиностроение", 1974.

С о д е р ж а н и е

Содержание и объем проекта	3
I. Введение	4
2. Описание физико-механических свойств материала заготовок	5
3. Обоснование температуры нагрева и допу- стимого перепада температуры поверхност- ных и центральных слоев материала	5
4. Сущность, основные законы и явления ин- дукционного нагрева	5
5. Эскизное проектирование печи	7
6. Расчет индуктора	18
7. Расчет системы охлаждения индуктора . .	34
8. Порядок расчета индукционной печи	40
9. Описание конструкции индукционной печи	42
10. Мероприятия по обеспечению техники безо- пасности при работе индукционной печи . .	43
II. Спецтема проекта	44
Графическая часть проекта	44
Л и т е р а т у р а	45

Глуценков Владимир Александрович

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ
И НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Учебное пособие, ч. II

Редактор Н.Н. Кузнецова

Корректор О.В. Удчина

Подписано в печать 17/ХП- 1975 г. ЕО 00314 .
Формат 60X841/16. Объем 3 п.л. Тираж 400 экз.
Цена 15 коп.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С.П. Королева,
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская 151.

Ротапечатьный цех областной типографии им. В.П.Мяги,
г. Куйбышев, ул. Венцека, 60. Заказ № 8034