

6  
А-63

**ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

---

**Л. С. ЗИМИН**

**ИССЛЕДОВАНИЕ  
И РАЗРАБОТКА УСТАНОВОК  
ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА  
ТЕЛ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ  
ИЗ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ**

**(Специальность 05.247 — «Электротермические  
процессы и установки»)**

**А в т о р е ф е р а т**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

**(Диссертация написана на русском языке)**

**МОСКВА 1971**

**ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

---

**Л.С. З И М И Н**

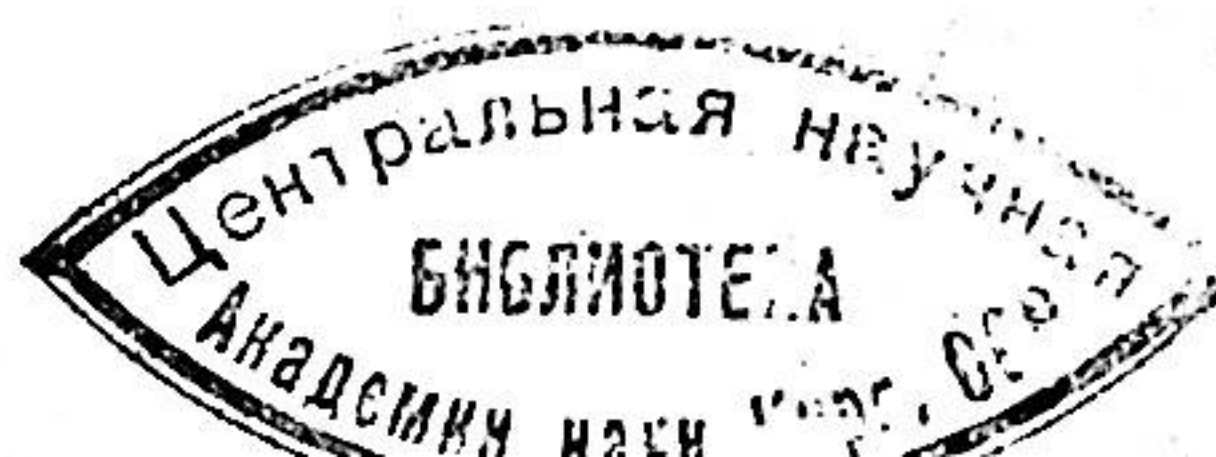
**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА УСТАНОВОК ДЛЯ  
ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ТЕЛ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ  
ИЗ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ**

**(Специальность 05.247 - "Электротермиче-  
ские процессы и установки")**

**А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**(Диссертация написана на русском языке)**

**Москва, 1971г.**



Работа выполнена на Куйбышевском Ордена Трудового Красного  
Знамени металлургическом заводе им.В.И.Ленина

Научный руководитель - кандидат технических наук

С.А.Яицков.

Научный консультант - кандидат технических наук, доцент

Э.Я.Рапопорт.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук М.Г.Коган

кандидат технических наук П.М.Чайкин

Ведущее предприятие - Верхне-Салдинский металлообрабаты-  
вающий завод, г.Верхняя Салда.

Автореферат разослан "16" VI 1971 г.

Защита диссертации состоится "16" XII 1971 г.  
на заседании Ученого Совета Всесоюзного научно-исследова-  
тельского института электротермического оборудования  
(Москва, X-52), Нижегородская ул. д.29).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ВНИИЭТО.

Отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просим  
направлять по адресу: Москва, X-52, Нижегородская ул.29,  
Ученый совет ВНИИЭТО.

Ученый секретарь совета

кандидат технических наук

(Р.В.Минаев)

Значительный вклад в выполнение задач, намеченных в Дирек-  
тивах XXIV съезда КПСС по девятому пятилетнему плану, в част-  
ности, по дальнейшему росту производительности труда и объема  
производства в металлургии, призвано внести дальнейшее совер-  
шенствование процессов обработки металлов давлением, тесно  
связанное с интенсификацией процесса нагрева металла. Наиболее  
перспективным в этом отношении является применение индукцион-  
ного нагрева, причем, не только в кузнечных и прессовых цехах,  
где уже сейчас общая мощность индукционных установок насчиты-  
вает несколько миллионов киловатт, но и в прокатном производ-  
стве.

Реферируемая работа посвящается комплексу вопросов, возни-  
кающих при разработке индукционных установок для нагрева сля-  
бов и других заготовок прямоугольного поперечного сечения.

Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов по  
работе и приложения.

Современное состояние вопроса. Задачи исследования

подавляющее большинство существующих индукционных устано-  
вок для сквозного нагрева металла рассчитано на нагрев цилинд-  
рических заготовок или призматических тел квадратного сечения  
небольшого размера.

Первая в мировой практике индукционная печь для нагрева  
слябов из алюминия и его сплавов была создана при участии  
автора в 1962 г.

В рекомендациях совещания по индукционному нагреву слитков  
перед горячей обработкой на заводах тяжелых и легких цветных  
металлов, проходившем в октябре 1962 г. и отметившего важность  
этой работы, говорится: "С целью быстрее распространения

и внедрения индукционных печей в прокатное производство советские считают необходимым ускорить окончание работ по доводке индукционной установки для нагрева слэбов".

Работы по созданию печей для индукционного нагрева слэбов проводились также во ВНИИЭТО, где был разработан, а затем внедрен в производство комплекс индукционных печей для нагрева титановых слэбов.

Ведутся работы в этом направлении и за рубежом, так, например, американской фирмой Эджакс Магнетермик (Уоррен, Огайо) создана индукционная установка для нагрева слэбов мощностью 210 мвт на заводе фирмы Мак-Лаут в Трентоне.

При внедрении рассматриваемых установок в производство, а также при их исследовании возникает целый ряд проблем, связанных с наиболее эффективным и рациональным использованием электромагнитной и тепловой энергии в индукционной печи.

При этом первостепенное значение приобретают вопросы распределения электромагнитной мощности в металле, построения температурного поля по объему нагреваемого тела, исследования характера и величины электродинамических усилий, действующих в системе "индуктор-металл". Особое значение в современных условиях начинают занимать также задачи оптимизации процесса индукционного нагрева рассматриваемых тел.

Диссертация посвящается рассмотрению перечисленных вопросов в аспекте, позволяющем получить результаты, вполне приемлемые для инженерных расчетов. В то же время, автор делает попытку решить поставленную задачу в возможно более общем виде, что позволило бы использовать результаты работы для подобных установок уже на стадии их проектирования и распространить методику рассмотрения не только на случай нагрева алюминия и его сплавов, а на гораздо более широкий круг нагреваемых металлов.

#### Распределение электромагнитной мощности в телах прямоугольной формы при индукционном нагреве

В работе получена закономерность распределения плотности активной мощности в нагреваемой заготовке прямоугольного сечения, для чего предварительно определены напряженности

магнитного и электрического полей. Для напряженности магнитного поля на основании уравнений электродинамики Максвелла можно получить

$$\nabla^2 \vec{H} = K^2 \vec{H} \quad (1)$$

где  $K = \frac{1+j}{\Delta}$ ;

$\Delta$  - глубина проникновения.

При решении уравнения (1) использовались следующие допущения:

- призма прямоугольного сечения ( $2a \times 2b$ ) находится в плоскопараллельном поле индуктора;
- свойства металлического тела однородны по сечению и длине.

При принятых допущениях уравнение (1) можно представить в виде:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = K^2 H, \quad (2)$$

с граничными условиями

$$H(x, y) = H_0 \quad \text{при } (x, y) \in \Gamma \quad (3)$$

Поставленная задача (2) + (3) решена в работе методом Б.Г.Галеркина, с усилением его для большей точности методом Л.В.Канторовича. Было получено точное решение уравнения (2):

$$H = H_0 \left\{ 1 - \frac{4}{\pi} K^2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m+1}}{(2m-1)\beta_m^2} \left[ 1 - \frac{\cosh \beta_m y}{\cosh \beta_m b} \right] \cos \left( \frac{2m-1}{2} \pi \frac{x}{a} \right) \right\} \quad (4)$$

где

$$\beta_m^2 = K^2 + \left[ \frac{\pi(2m-1)}{2a} \right]^2 \quad (5)$$

Использование выражения (4) для получения закона распределения плотности мощности в нагреваемом теле приводит, как показано в работе, к весьма сложному выражению, содержащему кратные ряды и неприемлемому для инженерных расчетов.

Учитывая сказанное в работе было получено также и приближенное решение уравнения (2), как первое приближение по методу Галеркина при выборе координатной функции, отвечающей физической сущности задачи:

$$\tilde{H} = H_0 \left[ 1 + \left( \frac{\text{ch} \kappa y}{\text{ch} \kappa b} - 1 \right) \left( 1 - \frac{\text{ch} B \kappa x}{\text{ch} B \kappa a} \right) \right] \quad (6)$$

где

$$B = \sqrt{\frac{2}{3 - \frac{\text{th} \kappa h^2 \text{th} \kappa}{\text{th} \kappa - \text{th} \kappa}}} = \tau + j\varsigma \quad (7)$$

Выражение для активной мощности, выделяемой в единице объема при условии, что поле индуктора плоскопараллельное, будет иметь вид

$$P_{(x,y)} = \frac{1}{2} \gamma [\dot{E}_x \dot{E}_x^* + \dot{E}_y \dot{E}_y^*] \quad (8)$$

где  $\gamma$  — удельная электропроводность.

На основании (6) и (8), в работе было получено выражение, определяющее закон распределения плотности активной мощности в поперечном сечении тела:

$$P_{(x,y)} = \frac{H_0^2}{\Delta^2} \frac{1}{\gamma} \left\{ (p^2 + q^2) \frac{\text{ch} 2(p-q)\frac{x}{\Delta} - \cos 2(p-q)\frac{x}{\Delta}}{\text{ch} 2(p-q)\frac{x}{\Delta} + \cos 2(p-q)\frac{x}{\Delta}} \left[ 1 + \frac{\text{ch} 2\frac{x}{\Delta} + \cos 2\frac{x}{\Delta}}{\text{ch} 2\frac{x}{\Delta} + \cos 2\frac{x}{\Delta}} - \frac{4(\text{ch} \frac{x}{\Delta} \cos \frac{x}{\Delta} \text{ch} \frac{x}{\Delta} \cos \frac{x}{\Delta} + \text{sh} \frac{x}{\Delta} \sin \frac{x}{\Delta} \text{sh} \frac{x}{\Delta} \sin \frac{x}{\Delta})}{\text{ch} 2\frac{x}{\Delta} + \cos 2\frac{x}{\Delta}} \right] + \right. \\ \left. + (z^2 + s^2) \frac{\text{ch} 2(z-s)\frac{y}{\Delta} - \cos 2(z-s)\frac{y}{\Delta}}{\text{ch} 2(z-s)\frac{y}{\Delta} + \cos 2(z-s)\frac{y}{\Delta}} \left[ 1 + \frac{\text{ch} 2\frac{y}{\Delta} + \cos 2\frac{y}{\Delta}}{\text{ch} 2\frac{y}{\Delta} + \cos 2\frac{y}{\Delta}} - \frac{4(\text{ch} \frac{y}{\Delta} \cos \frac{y}{\Delta} \text{ch} \frac{y}{\Delta} \cos \frac{y}{\Delta} + \text{sh} \frac{y}{\Delta} \sin \frac{y}{\Delta} \text{sh} \frac{y}{\Delta} \sin \frac{y}{\Delta})}{\text{ch} 2\frac{y}{\Delta} + \cos 2\frac{y}{\Delta}} \right] \right\} \quad (9)$$

где

$$p + jq = \sqrt{\frac{2}{3 - \frac{\text{ak} \text{th}^2 \text{ak}}{\text{ak} - \text{th} \text{ak}}}}$$

Приближенное выражение для полной активной мощности, выделяемой в призме прямоугольного сечения длиной  $\ell$  будет иметь вид:

$$\tilde{P} = \int_{-a}^a \int_{-b}^b P_{(x,y)} dx dy = \frac{H_0^2}{\Delta \gamma} 2(a+b) \cdot \ell \cdot F\left(\frac{a}{\Delta}, \frac{b}{\Delta}\right), \quad (10)$$

где

$$F\left(\frac{a}{\Delta}, \frac{b}{\Delta}\right) = \frac{p^2 + q^2}{p^2 + q^2} \left[ \frac{(p+q) \text{sh} 2(p-q)\frac{b}{\Delta} - (p-q) \sin 2(p-q)\frac{b}{\Delta}}{\text{ch}^2(p-q)\frac{b}{\Delta} + \cos(p+q)\frac{b}{\Delta}} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{1}{2\frac{a}{\Delta}} \times \right. \\ \times \left. \frac{\text{sh} 2\frac{a}{\Delta} + \sin 2\frac{a}{\Delta}}{\text{ch} 2\frac{a}{\Delta} + \cos 2\frac{a}{\Delta}} \right] \frac{1}{1 + \frac{b}{\Delta}} + \frac{z^2 + s^2}{z^2 + s^2} \left[ \frac{(z+s) \text{sh} 2(z-s)\frac{a}{\Delta} - (z-s) \sin 2(z-s)\frac{a}{\Delta}}{\text{ch} 2(z-s)\frac{a}{\Delta} + \cos 2(z+s)\frac{a}{\Delta}} \right] \times \\ \times \left[ 1 - \frac{1}{2\frac{b}{\Delta}} \frac{\text{sh} 2\frac{b}{\Delta} + \sin 2\frac{b}{\Delta}}{\text{ch} 2\frac{b}{\Delta} + \cos 2\frac{b}{\Delta}} \right] \frac{1}{1 + \frac{a}{\Delta}} \quad (11)$$

Выражения (9), (11) дают хорошую сходимость с аналогичными точными выражениями, вычисленными на ЭЦВМ "Урал-3" и приведенными в приложении к диссертации. В данном случае закон распределения плотности мощности по сечению выражается в конечной форме (вместо двойных рядов при точном решении), выражение (9) является вполне приемлемым для инженерных расчетов (значения  $p, q, z, s$  приведены в приложении) и может служить в качестве исходного алгоритма для исследования тепловых процессов при индукционном нагреве тел прямоугольной формы в плоскопараллельном поле. В работе приводятся графики эквивалентности мощности по сечению для некоторых характерных случаев, в частности, для нагрева слэбов из титановых и алюминиевых сплавов на промышленной частоте. На основании формулы (9) и графиков эквивалентности в работе делается вывод, что распределение плотности мощности полностью определяется отношением размеров поперечного сечения и отношением их к глубине проникновения тока.

#### Температурное поле в телах прямоугольной формы при индукционном нагреве

При исследовании тепловой задачи в работе принимается, что нагрев происходит в области температур, где физические

свойства металла не меняются скачком, т.е. можно оперировать средними теплофизическими константами. В этом случае процесс распределения температуры в поперечном сечении описывается уравнением:

$$\lambda \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) - c \frac{\partial t}{\partial \tau} + P_{(x,y)} = 0 \quad (I2)$$

с краевыми условиями:

$$t = 0 \text{ при } \tau = 0 \quad (I3)$$

$$\frac{\partial t}{\partial x} = \frac{\partial t}{\partial y} = -\frac{q}{\lambda} \text{ при } (x,y) \in \Gamma; \quad (I4)$$

$$\frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 \quad (I5)$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности,  $c$  — объемная теплоемкость,  $q$  — плотность тепловых потерь.

Решение уравнения (I2) с краевыми условиями (I3) + (I5) классическим способом при помощи разложения в двойной ряд Фурье по собственным функциям соответствующей задачи Штурма-Лиувилля приводит к выражению:

$$t_{(x,y,\tau)} = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{P_{m,n} \cos \frac{\pi m}{a} x \cdot \cos \frac{\pi n}{b} y}{\lambda \left[ \left( \frac{\pi m}{a} \right)^2 + \left( \frac{\pi n}{b} \right)^2 \right]} \left\{ 1 - \exp \left( - \left[ \left( \frac{\pi m}{a} \right)^2 + \left( \frac{\pi n}{b} \right)^2 \right] \tau \right) \right\} - \frac{q \cdot a}{2\lambda} \left\{ \left[ 2F_{01} + \left( \frac{x}{a} \right)^2 - \frac{1}{3} \right] + \frac{b}{a} \left[ 2F_{02} + \left( \frac{y}{b} \right)^2 - \frac{1}{3} \right] + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1}}{(k\pi)^2} \cos k\pi \frac{x}{a} \cdot \exp \left[ - (k\pi)^2 F_{01} \right] + \frac{b}{a} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{(-1)^{l+1}}{(l\pi)^2} \cos l\pi \frac{y}{b} \exp \left[ - (l\pi)^2 F_{02} \right] \right\}, \quad (I6)$$

где

$$P_{m,n} = \frac{\int_0^a \int_0^b P_{(x,y)} \cos \frac{\pi m}{a} x \cdot \cos \frac{\pi n}{b} y dx dy}{\int_0^a \cos^2 \frac{\pi m}{a} x dx \cdot \int_0^b \cos^2 \frac{\pi n}{b} y dy} \quad (I7)$$

Как видно, выражение определяющее температурное поле в прямоугольном сечении при индукционном нагреве с учетом того,

что точное выражение для  $P(x,y)$  содержит двойные ряды, получается весьма сложным, содержащим четырехкратные бесконечные ряды. Значительно упростить его можно, как показано в работе, лишь для частного случая, характеризуемого соотношениями  $a/\Delta \gg 10$ ,  $b/a \gg 1$  Тогда

$$t_{(x,y,\tau)} = \frac{P \cdot 2\tau}{8\lambda(1+\frac{b}{a})} \left\{ \left[ 2F_{01} + \left( \frac{x}{a} \right)^2 - \frac{1}{3} \right] + \frac{b}{a} \left[ 2F_{02} + \left( \frac{y}{b} \right)^2 - \frac{1}{3} \right] - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m+1}}{(\pi m)^2} \cos \pi m \frac{x}{a} \cdot \exp \left[ - (\pi m)^2 F_{01} \right] - \frac{b}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(\pi n)^2} \cos \pi n \frac{y}{b} \exp \left[ - (\pi n)^2 F_{02} \right] \right\} \quad (I8)$$

где  $F_{01} = \frac{\lambda \tau}{c \cdot a^2}$ ;  $F_{02} = \frac{\lambda \tau}{c \cdot b^2}$ ;  $S_0 = \frac{H_0^2}{2\lambda \Delta}$  — активная часть вектора Пойтинга, проходящего через поверхность полуограниченного тела. В практических случаях выражение (I8) может применяться для описания процесса нагрева слэбов из алюминиевых сплавов толщиной около 300 мм на промышленной и более высокой частотах.

Решение задачи, дающее выражение, приемлемое для инженерных расчетов при любых соотношениях размеров поперечного сечения и глубины проникновения, было получено методом Гринберга с использованием в качестве функции распределения источников тепла выражения (9) и для квазистационарной стадии процесса принимает вид:

$$t_{(x,y,\tau)} = \frac{1}{\lambda} \left\{ \frac{P}{2\frac{a}{\Delta}(1+\frac{b}{a})} \left[ \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{b}{a} \right) \frac{b}{\Delta} F_{02} + S \left( \frac{x}{a}, \frac{y}{b}, \frac{a}{\Delta}, \frac{b}{\Delta} \right) \right] - \frac{P(1-2\tau)}{8(1+\frac{b}{a})} \left[ \left[ 2F_{01} + \left( \frac{x}{a} \right)^2 - \frac{1}{3} \right] + \frac{b}{a} \left[ 2F_{02} + \left( \frac{y}{b} \right)^2 - \frac{1}{3} \right] \right] \right\} \quad (I9)$$

где

$$S \left( \frac{x}{a}, \frac{y}{b}, \frac{a}{\Delta}, \frac{b}{\Delta} \right) = \frac{1}{8} \frac{\Delta}{a} \left\{ \frac{p^2 + q^2}{(p \cdot q)^2} \left[ \frac{1}{1 + \frac{\cos 2(p+q)\frac{a}{\Delta}}{\operatorname{ch} 2(p-q)\frac{a}{\Delta}}} \right] \left[ 2\frac{a}{\Delta} - \operatorname{th} 2\frac{a}{\Delta} \left( \frac{1 + \frac{\sin 2\frac{a}{\Delta}}{\operatorname{sh} 2\frac{a}{\Delta}}}{1 + \frac{\cos 2\frac{a}{\Delta}}{\operatorname{ch} 2\frac{a}{\Delta}}} \right) \right] \left[ \frac{(p-q)^2}{(p+q)^2} \cdot \left( \frac{1}{2\frac{b}{\Delta}(p+q)} \frac{\sin 2(p+q)\frac{b}{\Delta}}{\operatorname{ch} 2(p-q)\frac{b}{\Delta}} - \frac{\cos 2(p+q)\frac{y}{b}}{\operatorname{ch} 2(p-q)\frac{b}{\Delta}} \right) + \frac{1}{2\frac{b}{\Delta}(p-q)} \operatorname{th} 2(p-q)\frac{b}{\Delta} - \frac{\operatorname{ch} 2(p-q)\frac{y}{b}}{\operatorname{ch} 2(p-q)\frac{b}{\Delta}} \right] + \frac{\tau^2 + s^2}{z-s} \left[ \frac{\operatorname{th} 2(z-s)\frac{a}{\Delta}}{1 + \frac{\cos 2\frac{b}{\Delta}}{\operatorname{ch} 2\frac{b}{\Delta}}} \right] \left[ \frac{1 - \frac{(z-s)}{2} \frac{\sin 2(z+s)\frac{a}{\Delta}}{\operatorname{sh} 2(z-s)\frac{a}{\Delta}}}{1 + \frac{\cos 2(z+s)\frac{a}{\Delta}}{\operatorname{ch} 2(z-s)\frac{a}{\Delta}}} \right] \left[ \frac{\cos 2\frac{y}{b}}{\operatorname{ch} 2\frac{b}{\Delta}} - \frac{\operatorname{ch} 2\frac{y}{b}}{\operatorname{ch} 2\frac{b}{\Delta}} - \frac{5}{2\frac{b}{\Delta}} \left( \frac{\sin 2\frac{b}{\Delta}}{\operatorname{ch} 2\frac{b}{\Delta}} - \right. \right. \right.$$

$$\begin{aligned}
& -th2 \frac{\delta}{\Delta} - 2 \left( \frac{\delta}{\Delta} \right)^2 \left[ \left( \frac{y}{\delta} \right)^2 - \frac{1}{3} \right] \left( 1 + \frac{\cos 2 \frac{\delta}{\Delta}}{ch 2 \frac{\delta}{\Delta}} \right) + 4 th 2 \frac{\delta}{\Delta} \left( \cos \frac{\delta}{\Delta} \sin \frac{y}{\Delta} - \sin \frac{\delta}{\Delta} \cos \frac{y}{\Delta} \frac{ch \frac{y}{\Delta}}{ch \frac{\delta}{\Delta}} \right) \Bigg] + \\
& + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1} 4}{\pi^4} \left( \frac{\alpha}{\Delta} \right)^3 \left\{ \left[ \frac{2 \left( \frac{\alpha}{\Delta} \right)^2 (p^2 + q^2)}{1 + \frac{\cos 2(p+q) \frac{\delta}{\Delta}}{ch 2(p+q) \frac{\delta}{\Delta}}} \right] \left[ \frac{th 2 \frac{\alpha}{\Delta}}{1 + \frac{\cos 2 \frac{\alpha}{\Delta}}{ch 2 \frac{\alpha}{\Delta}}} \right] \frac{[K^2 10 \left( \frac{\alpha}{\Delta} \right)^2 (1 - \frac{\sin 2 \frac{\alpha}{\Delta}}{ch 2 \frac{\alpha}{\Delta}})]}{[K^4 + 4 \left( \frac{\alpha}{\Delta} \right)^4] x} - \right. \\
& - \frac{[3K^4 - 8 \left( \frac{\alpha}{\Delta} \right)^4] (1 + \frac{\sin 2 \frac{\alpha}{\Delta}}{ch 2 \frac{\alpha}{\Delta}})}{x [K^4 - \left( \frac{2\alpha}{\Delta} \right)^4]} \cdot \left( \frac{1}{K^2 \left[ \frac{2\alpha}{\Delta} (p+q) \right]^2} \left[ \frac{ch 2(p+q) \frac{y}{\Delta}}{ch 2(p+q) \frac{\delta}{\Delta}} - \right. \right. \\
& - \frac{1}{K} \frac{2\alpha}{\Delta \pi} (p+q) th 2(p+q) \frac{\delta}{\Delta} \frac{ch \pi \frac{y}{\Delta}}{sh \pi \frac{\delta}{\Delta}} \Bigg] - \frac{1}{K^2 \left[ \frac{2\alpha}{\Delta} (p+q) \right]^2} \left[ \frac{\cos 2(p+q) \frac{y}{\Delta}}{ch 2(p+q) \frac{\delta}{\Delta}} + \frac{1}{K} \frac{2\alpha}{\Delta \pi} (p+ \right. \\
& + q) \frac{\sin 2(p+q) \frac{\delta}{\Delta}}{ch 2(p+q) \frac{\delta}{\Delta}} \cdot \frac{ch \pi \frac{y}{\Delta}}{sh \pi \frac{\delta}{\Delta}} \Bigg] + (z^2 + s^2) (z-s) \left[ \frac{th 2(z-s) \frac{\alpha}{\Delta}}{1 + \frac{\cos 2(z-s) \frac{\alpha}{\Delta}}{ch 2(z-s) \frac{\alpha}{\Delta}}} \right] \cdot \left[ \frac{1}{1 + \frac{\cos 2 \frac{\delta}{\Delta}}{ch 2 \frac{\delta}{\Delta}}} \right] \cdot \left[ \frac{1}{K^2 \left[ \frac{2\alpha}{\Delta} (z-s) \right]^2} \right. \\
& + \frac{(z-s) \frac{\sin 2(z-s) \frac{\alpha}{\Delta}}{ch 2(z-s) \frac{\alpha}{\Delta}}}{K^2 \left[ \frac{2\alpha}{\Delta} (z-s) \right]^2} \Bigg] \cdot \left( \frac{1}{K^2 \left( \frac{2\alpha}{\Delta} \right)^2} \left[ \frac{ch 2 \frac{y}{\Delta}}{ch 2 \frac{\delta}{\Delta}} - \frac{1}{K} \frac{2\alpha}{\Delta \pi} th 2 \frac{\delta}{\Delta} \cdot \frac{ch \pi \frac{y}{\Delta}}{sh \pi \frac{\delta}{\Delta}} \right] + \right. \\
& + \frac{1}{K^2 \left( \frac{2\alpha}{\Delta} \right)^2} \left[ \frac{\cos 2 \frac{y}{\Delta}}{ch 2 \frac{\delta}{\Delta}} + \frac{1}{K} \frac{2\alpha}{\Delta \pi} \frac{\sin 2 \frac{\delta}{\Delta}}{ch 2 \frac{\delta}{\Delta}} \frac{ch \pi \frac{y}{\Delta}}{sh \pi \frac{\delta}{\Delta}} \right] + \frac{1}{K^2} \left( 1 + \frac{\cos 2 \frac{\delta}{\Delta}}{ch 2 \frac{\delta}{\Delta}} \right) - \\
& - \frac{2}{K^4 + 4 \left( \frac{\alpha}{\Delta} \right)^4} \left[ K^2 th 2 \frac{\delta}{\Delta} \left( \cos \frac{\delta}{\Delta} \cos \frac{y}{\Delta} \frac{ch \frac{y}{\Delta}}{ch \frac{\delta}{\Delta}} + \sin \frac{\delta}{\Delta} \sin \frac{y}{\Delta} \frac{sh \frac{y}{\Delta}}{ch \frac{\delta}{\Delta}} \right) - K \left( \frac{\alpha}{\Delta} \right) \cdot \right. \\
& \cdot \frac{ch \pi \frac{y}{\Delta}}{sh \pi \frac{\delta}{\Delta}} \cdot \left( th 2 \frac{\delta}{\Delta} - \frac{\sin 2 \frac{\delta}{\Delta}}{ch 2 \frac{\delta}{\Delta}} \right) + 2 \left( \frac{\alpha}{\Delta} \right)^2 th 2 \frac{\delta}{\Delta} \left( \sin \frac{\delta}{\Delta} \cos \frac{y}{\Delta} \frac{ch \frac{y}{\Delta}}{ch \frac{\delta}{\Delta}} - \cos \frac{\delta}{\Delta} \sin \frac{y}{\Delta} \cdot \right. \\
& \cdot \frac{sh \frac{y}{\Delta}}{ch \frac{\delta}{\Delta}} \Bigg) + 2 \left( \frac{\alpha}{\Delta} \right)^3 \frac{1}{K} \left( th 2 \frac{\delta}{\Delta} + \frac{\sin 2 \frac{\delta}{\Delta}}{ch 2 \frac{\delta}{\Delta}} \right) \frac{ch \pi \frac{y}{\Delta}}{ch \pi \frac{\delta}{\Delta}} \Bigg] \Bigg\} \cos \pi \frac{x}{\Delta} \quad (20)
\end{aligned}$$

Выражение (20) вычислено для всех возможных случаев соотношения размеров поперечного сечения и глубины проникновения. Результаты вычислений даны в приложении к диссертации. Функция  $S(\frac{x}{\Delta}, \frac{y}{\delta}, \frac{\alpha}{\Delta}, \frac{\delta}{\Delta})$  представляет собой в относительных единицах разность между средней температурой и температурой в любой точке поперечного сечения нагреваемого тела при идеальной тепловой изоляции.

В работе представлены изотермы этих разностей в виде графиков, построенных для наиболее характерных случаев индукционного нагрева тел прямоугольной формы. Результаты расчетов по формуле (19) хорошо сходятся особенно в конечной стадии нагрева с данными экспериментов, проведенных на промышленных и опытных индукционных установках при нагреве заготовок из алюминиевых сплавов, титановых сплавов, меди, латуни, нейзильбера.

В результате обработки полученных результатов в плоскости отношения характерных размеров сечения  $\delta/\alpha$  и относительной глубины проникновения  $\alpha/\Delta$  получена кривая нулевого градиента температуры по периметру сечения для разных значений теплового к.п.д., что позволяет определить зоны перегрева и недогрева углов сечения по отношению к серединам граней, определить частоту тока, обеспечивающую необходимый градиент температуры, а также дать приводимые в работе рекомендации по методам выравнивания температурного поля в поперечном сечении тела прямоугольной формы.

Кроме исследования температурного поля в поперечном сечении нагреваемой заготовки в работе также рассмотрен вопрос о равномерности нагрева по длине. Этот вопрос является наиболее важным при индукционном нагреве крупных слэбов, для которых вполне приемлемым является нагрев на промышленной частоте, причем, встает вопрос о возможности применения многофазных индукторов, т.к. мощности требуются весьма большие и установка таких индукторов может оказать значительное влияние на равномерность загрузки фаз цеховой сети.

В работе исследуются температурные распределения при нагреве заготовок в однофазных и многофазных индукторах, приводятся результаты экспериментов, а так же дается анализ рас-

пределения температуры по длине заготовки при помощи эппр распределения напряженности магнитного поля по длине индуктора, снятых в однофазных, двухфазных и трехфазных индукторах. Эти эппры хорошо сходятся с эппрами, построенными аналитическим путем (в многофазных индукторах используется принцип суперпозиции) по полученной автором формуле, дающей значения напряженности на оси индуктора:

$$H_z = \frac{I \cdot W}{\pi e} \left\{ \arctg \frac{b}{a} \frac{e/2 - z}{\sqrt{(e/2 - z)^2 + a^2 + b^2}} + \arctg \frac{b}{a} \frac{e/2 + z}{\sqrt{(e/2 + z)^2 + a^2 + b^2}} + \arctg \frac{a}{b} \frac{e/2 - z}{\sqrt{(e/2 - z)^2 + a^2 + b^2}} + \arctg \frac{a}{b} \frac{e/2 + z}{\sqrt{(e/2 + z)^2 + a^2 + b^2}} \right\} \quad (21)$$

Показано, что высокая степень равномерности температурного поля по длине заготовки не может быть получена в многофазных индукторах при любой схеме соединения катушек. При достаточно жестких требованиях к перепаду температур по длине нагреваемого тела рекомендуется использовать однофазные индукторы при оптимальном соотношении длин индуктора и заготовки с использованием, если это необходимо, симметрирующих устройств.

#### Некоторые вопросы оптимального управления процессом индукционного нагрева

В четвертой главе работы рассматривается задача обеспечения максимальной производительности, трактуемая как задача обеспечения минимально достижимого времени процесса нагрева при управлении режимом со стороны мощности тепловыделения.

В отличие от известного в теории оптимального управления подхода к такой задаче, что в приложении к процессу нагрева массивных тел ведет к отысканию приближенно оптимального управляющего воздействия с неуправляемой погрешностью в достижении заданного температурного поля, здесь рассматривается данная оптимальная задача в условиях наперед заданной и понимаемой в определенном смысле точности обеспечения требуемого температурного распределения. Подобный подход, решая в известной мере задачу синтеза, значительно отличается от традиционного, представляющего лишь пассивные возможности анализа погрешностей достигаемого температурного поля.

Обычно степень неравномерности температурного поля

$\theta(x, y, z, \tau)$  оценивается среднеквадратичным отклонением

от требуемого распределения по области  $V$  определения  $\theta$ , т.е. требуется обеспечить соотношение

$$\int_V [\theta_p(x, y, z, \tau) - \theta_{ог}(x, y, z, \tau)]^2 dv \leq \varepsilon \quad (22)$$

где  $T$  — момент окончания процесса.

Однако, технологическим требованиям наиболее отвечает рассмотрение абсолютного отклонения температуры от заданного по всему объему нагреваемого тела, что соответствует заданию ошибки равномерного приближения в виде:

$$|\theta_p(x, y, z, \tau) - \theta_{ог}(x, y, z, \tau)| \leq \varepsilon \quad (23)$$

При фиксированном числе интервалов оптимального управления релейной формы необходимые соотношения для определения неизвестных длительностей всех интервалов управления определяются из условия ортогональности в точке конца процесса нормали к границе области, фиксирующей в терминах фазового пространства допустимую точность процесса, и всех линейно независимых векторов, касательных к кривым, лежащим на геометрическом месте точек, достижимых при оптимальной форме управления за фиксированное время из данного начального состояния (условие трансверсальности).

Конкретные задачи определения оптимального по быстродействию управления рассматриваются в работе на частном примере случая с поверхностным распределением источников, характерном для нагрева слябов промышленных габаритов из алюминиевых сплавов на промышленной и более высоких частотах.

При этом температурное распределение представляется в форме

$$\theta(e, \varphi) = \sum_{k=0}^{\infty} X_k(\varphi) \cos \mu_k e; \quad \mu_k = k \cdot \pi, \quad (24)$$

где  $e, \varphi$  — соответственно относительные значения координаты и времени;  $X_k(\varphi)$  — коэффициенты ряда Фурье. При заданной величине  $\varepsilon_0$  среднеквадратичной ошибки по (22) граница соответствующей области, определяющей  $\varepsilon_0$ ,

в фазовом пространстве коэффициентов  $X_k$  представляется в виде

$$S(\bar{x}) = x_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} x_k^2 - \varepsilon_0 = 0 \quad (25)$$

Используемый в работе метод позволяет определить в данном случае минимально достижимую ошибку  $\varepsilon_{min}$  в условиях фиксированного числа интервалов управления, что в свою очередь позволяет по заданной величине ошибки найти требуемое число интервалов. В работе для примера решена задача определения  $\varepsilon_{min}$  при двухинтервальном управлении.

В работе также решается оптимальная задача при фиксации допустимой погрешности в форме (23), причем, показывается неприменимость в данном случае условия трансверсальности в приведенной выше формулировке. Решение строится на использовании свойств температурного поля в конце оптимального процесса, фиксирующих на предельно допустимом уровне температуры всех точек экстремума результирующего распределения, к которым добавляется точка поверхности для случая ошибки минимакса. Роль этой точки для задачи с внутренним тепловыделением выполняет дополнительная точка экстремума, ближайшая к поверхности тела. Данные свойства сводят оптимальную задачу к решению системы трансцендентных уравнений для температур в указанных точках относительно искомых длительностей интервалов управления и величины ошибки минимакса. Эти уравнения в классе двухинтервальных управлений определяются соотношениями:

$$\theta_{2(0)} = -\varepsilon_{min}^{(2)}; \theta_{2(1)} = -\varepsilon_{min}^{(2)}; \theta_{2(\ell_2)} = \varepsilon_{min}^{(2)}; \frac{\partial \theta_2(\ell_2)}{\partial \ell} = 0, \quad (26)$$

а в классе трехинтервальных:

$$\theta_{3(0)} = -\varepsilon_{min}^{(3)}; \theta_{3(1)} = \varepsilon_{min}^{(3)}; \theta_{3(\ell_{31})} = -\varepsilon_{min}^{(3)}; \theta_{3(\ell_{32})} = \varepsilon_{min}^{(3)}; \frac{\partial \theta_3(\ell_{31})}{\partial \ell} = \frac{\partial \theta_3(\ell_{32})}{\partial \ell} = 0 \quad (27)$$

Здесь:  $1 > \ell_2 > 0$ ;  $1 > \ell_{31} > \ell_{32} > 0$ ;  $\ell_2$  — точки экстремума результирующего распределения;  $\varepsilon_{min}^{(2)}$  — ошибка минимакса в соответствующем классе управлений.

Результаты, полученные путем решения соответствующих систем уравнений на ЭЦВМ "Урал-3" представлены в графической форме, удобной для расчетов. Для задачи с  $\varepsilon_{min}^{(2)}$  получены приближенные аналитические выражения, определяющие:

$$\text{длительность второго интервала} \\ \exp(-\pi^2 \Delta) = \frac{\pi^2}{16} (1 - \psi), \quad (28)$$

$$\text{длительность первого интервала} \\ \psi_1 = \frac{\sqrt{1 + \Delta(1 - \psi)} + 0.0055}{1 + \psi} \quad (29)$$

$$\text{координату точки экстремума} \\ \frac{\sin \pi \ell_2}{\pi \ell_2} = \frac{4}{\pi^2}, \quad (30)$$

$$\text{ошибку минимакса} \\ \varepsilon_{min}^{(2)} = 0.08(1 - \psi) - 0.0146(1 - \psi)^4, \quad (31)$$

где  $\psi$  — критерий несимметрии управляющего воздействия;  
 $\sqrt{\phantom{x}}$  — относительное значение начальной температуры.

Параметры оптимального управления при фиксированной величины  $\varepsilon > \varepsilon_{min}^{(2)}$  будут определяться выражениями:

$$\varepsilon = \frac{1 - \psi}{4\pi^2} \pi \ell_2 (2 \tan \frac{\pi \ell_2}{2} - \pi \ell_2), \quad (32)$$

$$\exp(-\pi^2 \Delta) = \frac{1 - \psi}{4} \frac{\pi \ell_2}{\sin \pi \ell_2}, \quad (33)$$

$$\psi_1 = \frac{1}{1 + \psi} \left[ \sqrt{1 + \Delta(1 - \psi)} - \frac{1 - \psi}{6} + \frac{1 - \psi}{\pi^2} \frac{\pi \ell_2}{\sin \pi \ell_2} - \varepsilon \right] \quad (34)$$

В работе также приводятся соображения по решению опти-

мальной задачи по минимизации ошибки равномерного приближения к требуемому результирующему распределению за фиксированное время нагрева, намечены пути решения с учетом ограничений на фазовые координаты, определены пути реализации оптимального управления индукционным нагревом массивных тел.

#### Вибростойкость индукторов прямоугольной формы

В пятой главе работы выясняются причины возникновения и характер вибраций обмотки индуктора, определяется инженерный метод динамического расчета индуктора, намечаются пути устранения вибраций и шума.

В работе показано, что электродинамическое давление, действующее на обмотку индуктора, можно выразить в виде:

$$Q = 3,15 \cdot 10^{-4} \frac{P_s}{F(\frac{\alpha}{\alpha_0}, \frac{\beta}{\beta_0}) \sqrt{\rho_m f}} (1 + \cos 2\omega\tau), \quad (35)$$

где:  $F(\frac{\alpha}{\alpha_0}, \frac{\beta}{\beta_0})$  — определяется выражением (II);  $\rho, m$  — соответственно удельное сопротивление и относительная магнитная проницаемость нагреваемой заготовки;  $\omega = 2\pi f$  — угловая частота тока индуктора;  $P_s$  — поверхностная плотность мощности, поглощаемой нагреваемой заготовкой.

Из выражения (35) следует, что максимальные усилия вибраций возникают как раз для рассматриваемых в работе мощных установок для индукционного нагрева крупногабаритных изделий из немагнитных материалов с низким удельным сопротивлением (медь, алюминий) токами промышленной частоты.

В работе показывается, что с точки зрения динамического расчета индуктор в поперечном сечении можно рассматривать в виде упругой рамы, расчет которой с приемлемой для практики точностью можно вести по методу приведения. Для полученной таким методом системы с одной степенью свободы уравнение колебаний будет иметь вид:

$$\frac{d^2\varphi}{d\tau^2} + 2n \frac{d\varphi}{d\tau} + p^2\varphi = \frac{F}{m} (1 + \cos 2\omega\tau), \quad (36)$$

где  $\varphi$  — амплитуда колебаний точки в середине широкой стороны индуктора,  $F, m$  — соответственно приведенные сила и масса,  $p$  — круговая частота собственных колебаний индуктора,  $n$  — коэффициент, характеризующий вязкость.

Решение уравнения (29) при нулевых начальных условиях для установившегося режима имеет вид:

$$\varphi = \varphi_{ст} [1 + K_d \cos(2\omega\tau - \beta)], \quad (37)$$

где  $\varphi_{ст}$  — статический прогиб;

$$K_d = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\frac{2\omega}{p})^2]^2 + (\frac{4n\omega}{p^2})^2}} \quad (38)$$

— коэффициент динамичности:

$$\beta = \arctg \frac{4n\omega}{p^2 - 4\omega^2} \quad (39)$$

— сдвиг фаз, характеризующий отставание фазы перемещения от фазы возмущающей силы.

Уровень возникающего в окружающей среде звукового давления можно представить в виде:

$$V = 20 \lg \frac{v}{v_0} (дБ) \quad (40)$$

где  $v_0$  — эффективное значение колебательной скорости на пороге слышимости, для воздуха равно  $5 \cdot 10^{-8}$  м/сек,

$v$  — эффективное значение скорости вибраций, равно

$$v = -\sqrt{2} \cdot \omega \cdot \varphi_{ст} \cdot K_d \sin(2\omega\tau - \beta) \quad (41)$$

В работе показано, что наиболее эффективной является борьба с шумом непосредственно в источнике, которая осуществляется или виброгашением, или вибропоглощением причем, материалом, удачно сочетающим оба этих свойства, а также служащим хорошим электроизолятором, является стеклопластик.

В работе описывается технология изготовления стеклопластиковой оболочки индуктора, приводятся результаты экспериментальных исследований вибраций армированного индуктора, исследована эффективность гашения шума при дополнительном обжатии армированного индуктора бетонными блоками, а также за счет увеличения толщины наружного слоя стеклопластика.

В работе описан вариант конструкции индуктора повышенной вибростойкости, технология изготовления железобетонного корпуса которого предусматривает затвердевание бетона под давлением.

В работе также исследуются вибрации конструкции индуктора при широком варьировании возмущающих сил, жесткостей, масс и вязкости методом моделирования на аналоговых вычислительных машинах типа МН-7.

#### Опыт проектирования и эксплуатации индукционных установок промышленной частоты для нагрева тел прямоугольной формы

В заключительной главе работы обобщается опыт многолетней работы автора по внедрению в производство индукционных установок для нагрева заготовок, имеющих прямоугольное поперечное сечение.

К этим установкам прежде всего относятся индукционные печи для нагрева слабов из алюминиевых сплавов перед прокаткой. Первый опытно-промышленный образец такой печи был изготовлен на одном из заводов в 1962 году. Внедрены в производство, с участием автора, индукционные печи для нагрева плоских слитков из алюминия и его сплавов перед прессованием на мощных гидравлических прессах. В 1966 г. была создана более совершенная, трехфазная индукционная печь для нагрева слабов мощностью 1500 квт.

На основе опытно-промышленной эксплуатации путем пересчета, на индукционные печи вертикального исполнения доказано, что блок таких печей, занимающий площадь в пять раз меньшую, чем современные печи сопротивления, обеспечивает тот же темп прокатки слабов из алюминиевых сплавов.

В работе приводится подробная техническая характеристика указанных печей, дается анализ конструктивных особенностей

подобных установок. Касаясь вопросов проектирования, в работе особое внимание уделяется применению для этой цели физического моделирования на повышенной частоте.

В работе приводится полученный по результатам эксплуатации указанных установок обширный материал по влиянию заполнения индуктора металлом на производительность печи, приводятся данные по эксплуатации индукторов в однофазном, двухфазном и трехфазном исполнении, подчеркивается, что каждый индуктор необходимо выполнять под строго определенные размеры нагреваемой заготовки. Учитывая значительную долю твердых алюминиевых сплавов в общем объеме металла, идущего на прокат, были произведены экспериментальные и промышленные нагревы плакированных слабов. Нагрев таких слабов происходил вполне удовлетворительно, перепады температуры между планшетом и slabом весьма незначительны.

Полный комплекс контрольных испытаний, проведенных при промышленной прокатке слабов, нагретых в индукционных печах, показал, что режим прокатки их не отличался от режима прокатки слабов, нагретых в печах сопротивления. Механические испытания показали, что прокатные листы удовлетворяют требованиям ГОСТа 4977-52 во всех состояниях поставки (М и Т).

В работе приводятся технические характеристики индукционных установок для подогрева стальных крупногабаритных штампов, разработанных при участии автора. Описывается принцип построения системы стабилизации температуры штампов.

#### Основные итоги и выводы

1. Получено в конечной форме, вполне приемлемой для инженерных расчетов, аналитическое выражение закона распределения активной мощности в поперечном сечении нагреваемого тела прямоугольной формы.

2. При анализе показано, что распределение плотности мощности по сечению зависит как от соотношения размеров поперечного сечения, так и от отношения их к глубине проникновения.

3. Для возможных случаев индукционного нагрева тел прямоугольной формы вычислена функция, определяющая распределение плотности мощности по сечению.

4. Определены соотношения размеров и глубины проникновения, при которых может идти речь об определенной глубине активного слоя вдоль всего периметра поперечного сечения нагреваемой заготовки.

5. Получено аналитическое выражение, определяющее температурное поле в прямоугольной призме при индукционном нагреве.

6. Для всех возможных соотношений размеров и глубины проникновения вычислена функция, определяющая температурное поле в сечении.

7. Установлены подтвержденные экспериментально закономерности, определяющие градиенты температур по периметру прямоугольного сечения и определены зоны перегрева и недогрева углов и ребер по сравнению с гранями в зависимости от соотношения размеров, глубины проникновения и теплового КПД.

8. Рассмотрены методы создания необходимых градиентов температур по периметру поперечного сечения нагреваемого тела.

9. Получено аналитическое выражение для напряженности магнитного поля на оси индуктора прямоугольной формы. Исследован характер распределения напряженности магнитного поля по длине многофазного индуктора в загруженном и холостом состоянии.

10. Экспериментально исследован вопрос равномерности нагрева по длине заготовки при садовом режиме нагрева в однофазном, двухфазном и трехфазном индукторах.

11. В работе ставится и даются пути решения задачи оптимального в определенном смысле управления процессом индукционного нагрева тел прямоугольной формы в условиях заранее фиксируемой допустимой ошибки достижения требуемого температурного поля.

12. Рассмотрена данная оптимальная задача при заданной предельно допустимой величине абсолютного температурного перепада по всему объему нагреваемого тела, что наиболее соответствует обычно предъявляемым технологическим требованиям.

13. Приведен пример конкретного расчета оптимальной задачи для широко примененного частного случая представления процесса индукционного нагрева в виде тепловой задачи с граничными условиями второго рода.

14. Показано, что оптимальная программа изменения во времени управляющей мощности в условиях отсутствия фазовых

ограничений представляет собой простую релейную функцию, имеющую не более трех интервалов постоянства при всех практических требованиях технологии нагрева.

15. Исследованы причины возникновения вибраций и шума при работе индукционных установок прямоугольной формы.

16. Получены выражения, приемлемые для инженерных расчетов, по которым, располагая информацией относительно распределения масс и жесткостей конструкции индуктора, можно рассчитать амплитуды и скорости вибраций.

17. В результате теоретических и экспериментальных исследований показано, что наиболее удачным материалом для армирования прямоугольных индукторов является стеклопластик, обладающий как вибропоглощающими, так и виброгасящими свойствами.

18. Впервые в мировой практике с участием автора созданы печи, индукторы которых для увеличения жесткости и устранения шума заключены в бетонную оболочку.

19. Показана эффективность использования аналоговых машин для исследования вибраций индуктора при широком варьировании возмущающих сил, жесткостей, масс и вязкости.

20. Показана возможность применения физического моделирования для расчета электрических параметров индукторов прямоугольной формы.

21. В результате теоретических и экспериментальных исследований были созданы и введены в опытно-промышленную и промышленную эксплуатацию индукционные печи для нагрева слэбов из алюминиевых сплавов перед прокаткой и плоских слитков перед прессованием.

22. Внедрена в производство и успешно эксплуатируется серия индукционных установок для подогрева стальных крупногабаритных прямоугольных штампов на вертикальных прессах, что позволило значительно снизить брак готовой продукции по рекристаллизации, улучшило условия труда и сократило простой пресса на переналадку.

1. Гецелев З.Н., Астанин С.Д., Рапопорт Э.Я., Зимин Л.С., Сабуров В.В., Индукционная печь. Авторское свидетельство № 154555. "Бюллетень изобретений и открытий", № 10, 1963.
2. Зимин Л.С., Сабуров В.В. Индуктор для нагрева. Авторское свидетельство № 235860. "Бюллетень изобретений и открытий", № 6, 1969.
3. Зимин Л.С., Тихонов И.В., Лукин К.А. Вибрационная установка. Решение о выдаче авторского свидетельства по заявке 1630865/29-33 с приоритетом от 22.3.1971г.
4. Гецелев З.Н., Астанин С.Д., Зимин Л.С., Сабуров В.В., Индукционная печь для нагрева слитков из алюминиевых сплавов прямоугольного сечения. Научно-технический сборник "Электротермия", № 11, 1963.
5. Мочалов П.П., Курбатов В.А., Гецелев З.Н., Астанин С.Д., Зимин Л.С., Сабуров В.В. Индукционная печь для нагрева плоских слитков. "Цветные металлы", № 4, 1965.
6. Гецелев З.Н., Астанин С.Д., Зимин Л.С., Сабуров В.В. Индукционная печь для нагрева крупных слитков прямоугольного сечения. Технология изготовления полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, вып. I, ЦНИИЦВЕТМЕТ, М., 1964.
7. Зимин Л.С., Некоторые вопросы индукционного нагрева тел прямоугольной формы. Тезисы докладов 6-й научно-технической конференции по применению ТВЧ в электротермии. Л., 1968.
8. Зимин Л.С., Особенности индукционного нагрева тел прямоугольной формы. Применение ТВЧ в электротермии. Тезисы докладов 7-й Всесоюзной конференции. Л., 1971.
9. Зимин Л.С., Рапопорт Э.Я., Оптимизация процесса индукционного нагрева массивных тел прямоугольной формы с равномерным приближением к требуемому результирующему температурному распределению. Там же.
10. Зимин Л.С., Индукционный нагрев тел прямоугольной формы. Информалектро, "Электротермия", вып. 86, 1969.
11. Зимин Л.С., Электромагнитная задача при индукционном нагреве тел прямоугольной формы. Электротехника и энергетика. Тезисы докладов общесоюзной научно-технической конференции, Куйбышев, 1969.

12. Зимин Л.С., Оптимальные электромагнитные параметры индукционных установок для равномерного нагрева прямоугольных тел. Там же.

13. Зимин Л.С. Об алгоритме функционирования процесса индукционного нагрева тел прямоугольной формы. Алгоритмизация и автоматизация процессов и установок, вып. 2, Куйбышев, 1970.

14. Гецелев З.Н., Зимин Л.С., Стабилизация температуры крупногабаритных штампов на вертикальных прессах. Цветметинформация, "Цветная металлургия", № 16, 1970.

15. Зимин Л.С. Алгоритмизация процесса индукционного нагрева тел прямоугольной формы. Сборник трудов ученых Поволжья. "Автоматизированный электропривод и автоматизация технологических процессов", Куйбышев, 1971.

16. Зимин Л.С., Рапопорт Э.Я. Оптимальное по быстродействию управление нагревом массивных тел с заданной среднеквадратичной погрешностью результирующего температурного распределения. Там же.

17. Зимин Л.С., Рапопорт Э.Я. К решению задачи оптимального быстродействия для нагрева массивных тел с заданным равномерным приближением. Там же.

18. Зимин Л.С. К оценке влияния частоты тока на алгоритм функционирования процесса индукционного нагрева тел прямоугольной формы. Автоматическое управление и регулирование в различных отраслях народного хозяйства. Вып. I, Куйбышев, 1971.

19. Зимин Л.С. Динамика систем для индукционного нагрева тел прямоугольной формы. Там же.

20. Зимин Л.С. Индукционный нагрев заготовок прямоугольного сечения. Применение и перспективы развития индукционного и контактного нагрева на заводах отрасли. Тезисы докладов, ВИС, 1971.

По теме диссертации сделаны доклады

1. На научно-технической конференции КНТИ по результатам научно-исследовательских работ за 1966 г., посвященной 50-летию Советской власти. Куйбышев, 1967.

2. На 6-й научно-технической конференции по применению ТВЧ в электротермии. Ленинград, 1968.

3. На юбилейной научно-технической конференции КПТИ, посвященной 100-летию со дня рождения В.И.Ленина, Куйбышев, 1969.

4. На научно-технической конференции КПТИ по итогам научно-исследовательской работы за 1969-1970 годы, Куйбышев, 1971г.

5. На Республиканской научной конференции по автоматическому управлению техническими процессами в различных отраслях народного хозяйства. Куйбышев, 1971г.

6. На 7-й Всесоюзной конференции по применению ТВЧ в электротермии. Ленинград, 1971г.

7. На научно-техническом семинаре "Применение и перспективы развития индукционного и контактного нагрева на заводах отрасли". Белая Калитва, 1971г.

ЕО 01402. Подписано в печать 28/X 1971 г., формат 60x84 1/16,  
объем 1,5 печ. л., тираж 200 экз.

Областная типография имени Маяки, г. Куйбышев, ул. Венцека, 60.  
Ротапринтное отделение. Заказ № 6838.