

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Государственное образовательное учреждение  
Высшего профессионального образования  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ «МАМИ»

Кафедра: «Машины и технологии литейного производства»

Маляров А.И. Минаев А.А. Миронов А.С.

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ИНДУКЦИОННЫХ  
ТИГЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ**

Методические указания к расчётно-графической работе по курсу «Печи в литейном производстве» для студентов, обучающихся по специальностям 150204 - «Машины и технология литейного производства» и 261001 – «Технология художественной обработки материалов», а также по направлениям подготовки бакалавра 150400 – «Технологические машины и оборудование» и магистра 150400– «Технологические машины и оборудование». Специализация – «Машины и технология литейного производства».

Одобрено методическими комиссиями по специальностям 150204 – «Машины и технология литейного производства» и 261001 – «Технология художественной обработки материалов», и направлению подготовки 150400 – «Технологические машины и оборудование».

МОСКВА - 2010

УДК 621.745.

*Разработано в соответствии с Государственным образовательным стандартом ВПО 2000г. для специальностей 150204 - «Машины и технология литейного производства» и 261001 – «Технология художественной обработки материалов», а также направлений подготовки бакалавра 150400 – «Технологические машины и оборудование» и магистра 150400– «Технологические машины и оборудование». Специализация – «Машины и технология литейного производства».*

- главный энергетик Московского государственного технического университета «МАМИ» кандидат технических наук, доцент Макаров В.С

- доцент кафедры «Электрооборудование автомобилей» Хортов В.П.

Работа подготовлена на кафедре «Машины и технология литейного производства»

Электрический расчёт индукционных тигельных печей: Методические указания к расчётно-графической работе по курсу «Печи в литейном производстве» для студентов направления подготовки дипломированных специалистов по специальности 50200.65 — «Машиностроительные технологии и оборудование», и специальности 150204.65 «Машины и технология литейного производства» / А.И. Маляров, А.А. Минаев, А.С. Миронов - М.: МГТУ «МАМИ», 2009.

В методических указаниях изложена методика и примеры электрического расчёта индукционных тигельных печей. В электронной версии методических указаний приведены программы расчётов, выполненные в таблицах Excel.

Цель расчётно-графической работы – дать возможность студентам количественно оценить влияние конструктивных и технологических факторов на КПД индукционно-тигельных печей и на этой основе принимать оптимальные конструктивные параметры проектируемых или модернизируемых печей.

УДК 621.745

©А.И. Маляров, А.А. Минаев А.С. Миронов,  
©МГТУ «МАМИ», 2010

## ВВЕДЕНИЕ

Плавильные отделения литейных цехов и, частности, индукционные плавильные печи являются наиболее мощными электроэнергии в машиностроении. Постоянно увеличивающаяся доля стоимости энергоносителей в себестоимости отливок требует повысить уровень подготовки технологов и конструкторов, занятых в литейном производстве в области теории и практики индукционного нагрева.

### 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ИНДУКЦИОННЫХ ТИГЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ.

#### 1.1 Методика расчёта

За основу взята методика, изложенная в работе [1]. При этом используются обозначения величин используемые в этой работе.

##### 1.1.1 Исходные данные для проектирования включают в себя:

###### *А. Данные расплавляемого металла или сплава*

1. Наименование, марка, состав.
2. Теплосодержание сплава при температуре разливки  $C_i$ , кДж/кг;
3. Удельное сопротивление при температуре  $20^\circ\text{C}$  -  $\rho_{20}$  и температуре разливки -  $\rho_{\text{разл.}}$ , Ом-м.

Для ферромагнитных металлов, кроме того, желательно иметь значение  $\rho_K$  при температуре потери магнитных свойств — в точке Кюри.

4. Форма и средний размер кусков –  $d_{\text{ш}}$ , м.
5. Плотность сплава при температуре разливки –  $\rho$  пл.ж., кг/м<sup>3</sup>.

###### *Б. Производительность и емкость печи*

1. Полезная емкость тигля  $G_T$ , кг. Эта величина определяются технологическими соображениями, например металлоёмкостью формы.

3. Продолжительность плавки –  $t_{пл.}$ , час. Эта величина не включает в себя продолжительность загрузки шихты и раздачи металла.

### 1.1.2 Определение геометрических размеров тигля и индуктора

По полезной ёмкости тигля определяют его полезный объем –  $V_T$ , м<sup>3</sup>

$$V_T = \frac{G_T}{\rho_{пл.ж}} \quad (1)$$

Для расплавленной стали  $\rho_{пл.ж} = 7,2 \cdot 10^3$ , кг/м<sup>3</sup>.

Для выбора формы тигля необходимо задаться отношением  $d_0/h = A$ ,

где:  $d_0$  – средний внутренний диаметр тигля, м;

$h$  – высота металла в тигле, м (рис.1).

Величина этого отношения у современных тигельных печей колеблется в широких пределах, но в среднем для большого количества печей  $A = 0,8$ , независимо от выплавляемого металла или сплава, емкости и типа печи (вакуумной или открытой).

Полезный объем тигля, если считать его цилиндром диаметром  $d_0$  и высотой  $h$ , равен:

$$V_T = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \cdot h, \text{ м}^3 \quad (2)$$

Поэтому:

$$d_0 = \sqrt[3]{\frac{4AV_T}{\pi}}, \text{ м.} \quad (3)$$

Внутренний диаметр индуктора –  $D_B$  определяют по формуле:

$$D_B = d_0 + 2(\Delta_{СТ.} + \Delta_{ОБ.}), \text{ где:} \quad (4)$$

$\Delta_{СТ.}$  – толщина стенки тигля.

Для печей ёмкостью менее 1000кг она определяемая по формуле:

$$\Delta_{СТ.} = 0,0079 \cdot \ln G_m + 0,0132; \text{ м} \quad (5)$$

Для печей ёмкостью 1000кг и более:

$$\Delta_{СТ.} = 0,06 + 10^{-5} \cdot G_T \quad (5a)$$

$\Delta_{ОБ.}$  - толщина слоя обмазки индуктора обычно равная 0,007м.

Высота индуктора обычно превышает высоту металла в тигле:

$$h_u = 1,2 \cdot h \quad (6)$$

### 3.1.3 Определение требуемой активной мощности, выделяющейся в садке печи

Эта мощность -  $P_{a.c}$  расходуется на нагрев и плавление шихты, а также на тепловые потери и вычисляется по формуле:

$$P_{ac} = \frac{G_T \cdot C_i}{t_{nl} \cdot 3600 \cdot \eta_{терм}} \text{ ,кВт,} \quad (7)$$

где:  $\eta_{терм}$  – термический КПД печи, величина которого составляет 0,75-0,85.

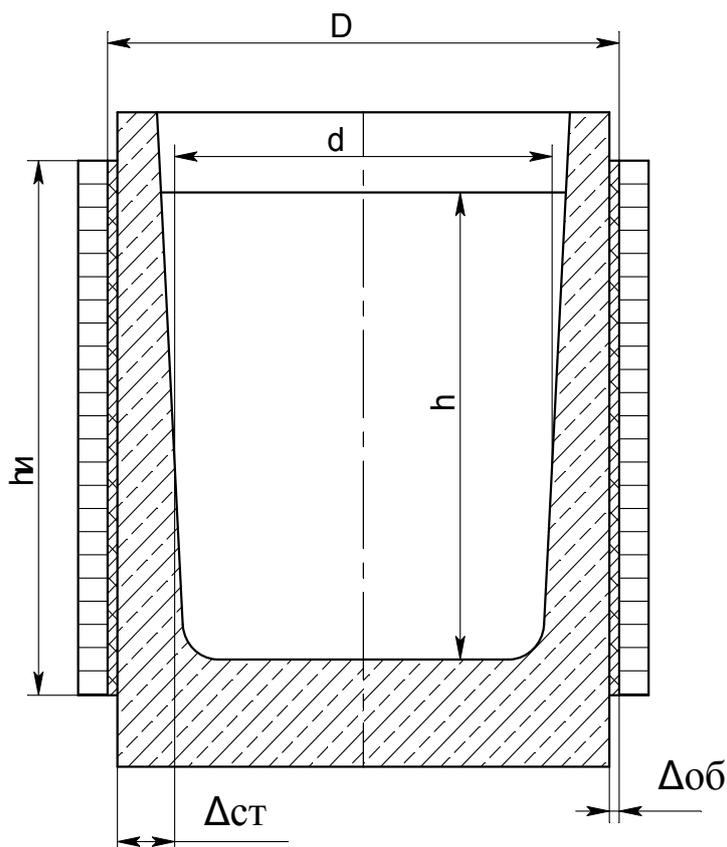


Рис.1 Обозначение размеров системы тигель - индуктор

### 1.1.4 Выбор частоты тока в индукторе

Частоту тока в индукторе следует выбирать для периода нагрева кусковой шихты потерявшей магнитные свойства по формуле:

$$f_{\text{мин.}} \geq 4,54 \cdot 10^6 \frac{\rho_{\text{разл.}}}{d_{\text{ш}}^2}, \text{Гц} \quad (8)$$

### 1.1.5 Вычисление необходимого настила тока в индукторе

Уравнения, связывающие настил тока в индукторе с активной мощностью в садке и индукторе конечной длины, аналогичны уравнениям, полученным для системы индуктор – садка бесконечно длинным (9,10).

$$P_{a.c} = 6,20 \cdot 10^{-6} (I_{\text{оинд}} \cdot w_{1,0})^2 \cdot d \cdot h \cdot \sqrt{\rho_c \cdot \mu \cdot f} \cdot F_{\text{оц}} \cdot k_s^2, \text{кВт} \quad (9)$$

В это уравнение добавлены ранее высчитанная глубина металла в тигле –  $h$  а также функции  $F_{\text{оц}}$  и  $k_s$ , , учитывающие действие торцевых эффектов системы индуктор садка проектируемой печи. Значения этих функций определяются по формулам и графикам, которые будут приведены далее.

Из формулы (9) следует, что настил тока в индукторе для получения требуемой активной мощности в садке (см. 1.1.3) проектируемой печи равен:

$$(I_{\text{оинд}} \cdot w_{1,0}) = \frac{10^3}{k_s} \cdot \sqrt{\frac{P_{a.c}}{6,20 \cdot d \cdot h \cdot \sqrt{\rho_c \cdot \mu \cdot f} \cdot F_{\text{оц}}}}, \text{АВ/м} \quad (10)$$

### 1.1.6 Вычисление активной мощности системы индуктор - садка

Эта мощность является суммой активных мощностей в садке и в индукторе:

$$P_a = P_{ac} + P_{ai} \quad (11)$$

Вычисление активной мощности в индукторе проводят по формуле:

$$P_{a.u} = 6,20 \cdot 10^{-6} (I_{оинд.} \cdot w_{1,0})^2 \cdot D \cdot h_u \cdot \sqrt{\rho_u f} \cdot \frac{F_{в.ц.н}}{k_{з.у.}}, \text{кВт} \quad (12)$$

Способ вычисления коэффициентов  $F_{в.ц.н}$  и  $k_{з.у.}$  будет представлен ниже.

### 1.17 Выбор марки преобразователя частоты

Частота тока преобразователя выбирается по каталогам с учётом п. 1.1.4.

Мощность преобразователя частоты должна быть больше чем суммарная активная мощность в садке и в индукторе на 10...15% с учётом потерь в конденсаторах и токоподводе.

### 1.1.8 Вычисление реактивной мощности в системе индуктор - садка

Эта величина необходима для расчёта количества компенсирующих конденсаторов в коротком колебательном контуре установки. Она складывается из реактивной мощности в садке –  $P_{cq}$ , в индукторе -  $P_{uq}$  и в зазоре между ними -  $P_{зq}$ .

$$P_q = P_{cq} + P_{uq} + P_{зq}, \quad \text{кВАр} \quad (13)$$

$$P_{cq} = 6,20 \cdot 10^{-6} \cdot (Iw_{1,0})^2 \cdot d \cdot h \sqrt{\rho_c \cdot \mu \cdot f} \cdot G_{оц} \cdot k_s^2, \quad \text{кВАр} \quad (14)$$

$$P_{uq} = 6,20 \cdot 10^{-6} \cdot (Iw_{1,0})^2 \cdot D \cdot h_u \sqrt{\rho_u \cdot f} \cdot \frac{G_{в.ц.н}}{k_{з.у.}}, \quad \text{кВАр} \quad (15)$$

$$P_{зq} = 6,20 \cdot 10^{-6} \cdot (Iw_{1,0})^2 \cdot f \cdot d^2 \cdot h \cdot \left[ \left( \frac{D}{d} \right)^2 - 1 \right], \quad \text{кВАр} \quad (16)$$

По номинальному напряжению преобразователя частоты выбирают марку конденсаторов. Ёмкость батареи конденсаторов определяют по формуле:

$$C = \frac{Pq \cdot 10^9}{2 \cdot 3,14 \cdot f \cdot U_K^2} \quad (17)$$

Способы определения функций  $G_{ou}$  и  $G_{в.ц.п}$  будут изложены ниже.

### 1.1.9 Вычисление значений функций и коэффициентов

Коэффициент  $k_s$ , необходимый для вычисления настила тока в индукторе, следует определять по формуле:

$$k_s = \frac{\pi^2}{2} \cdot \left( \frac{d^1}{h} \right) \cdot \frac{\left( \frac{h_u}{h} \cdot M_o \right)}{L_o} \quad (18)$$

Здесь  $d^1 = d - \Delta_{\varepsilon}$  — средний диаметр «катушки», эквивалентный садке.

Выражение  $\left( \frac{h_u}{h} \cdot M_o \right)$  можно найти по графику (рис.2).

Значение функции  $L_o$  определяют по графику (рис.3).

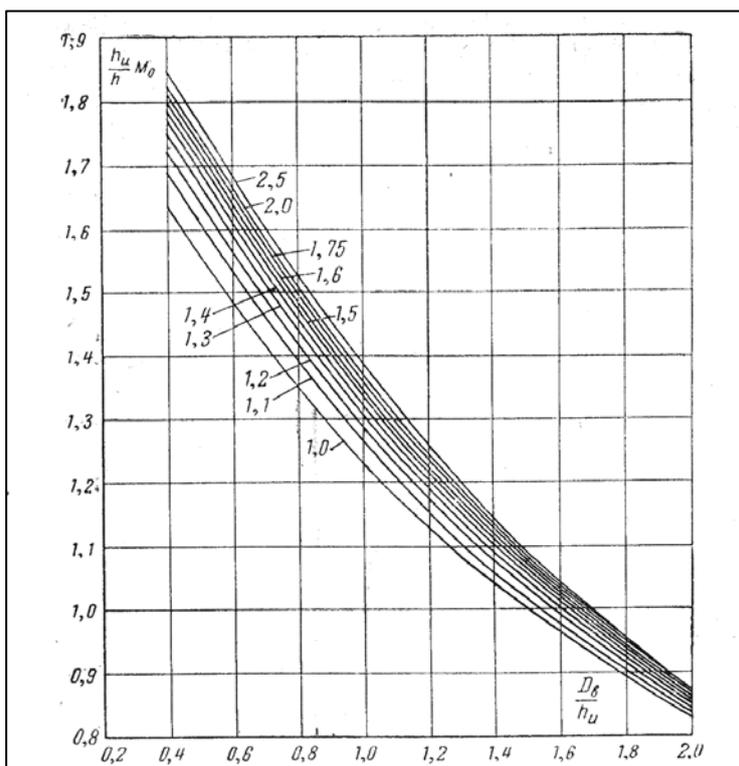


Рис.2 Графики аргумента  $(h/h_u) \cdot M_o$

Графики функций  $F_{ou}$  и  $G_{ou}$  приведены на рис.4. При значениях аргумента

$\frac{d \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot \Delta_{\varepsilon}}$  больших 10, их величины принимают равными 1. Толщина

стенок трубки индуктора должна превышать глубину проникновения тока в медь в 1,3 раза. При этом  $F_{вцп}$  и  $G_{вцп}$  будут равны 1.

В противном случае их значения определяют по графику на рис.5.

Коэффициент заполнения индуктора  $k_{зи} = \frac{h_u - \Sigma_{изол.}}{h_u}$  принимают равным 0,7...0,9.

$\Sigma_{изол.}$  - суммарная толщина межвитковой изоляции.

**Вопросы для самопроверки:**

- 1. Какие величины необходимы для выбора преобразователя?**
- 2. По каким параметрам выбирают тип и ёмкость конденсаторов?**
- 3. Чем отличаются расчеты, проводимые для системы индуктор - садка бесконечной длины, от системы индуктор - садка проектируемой печи?**

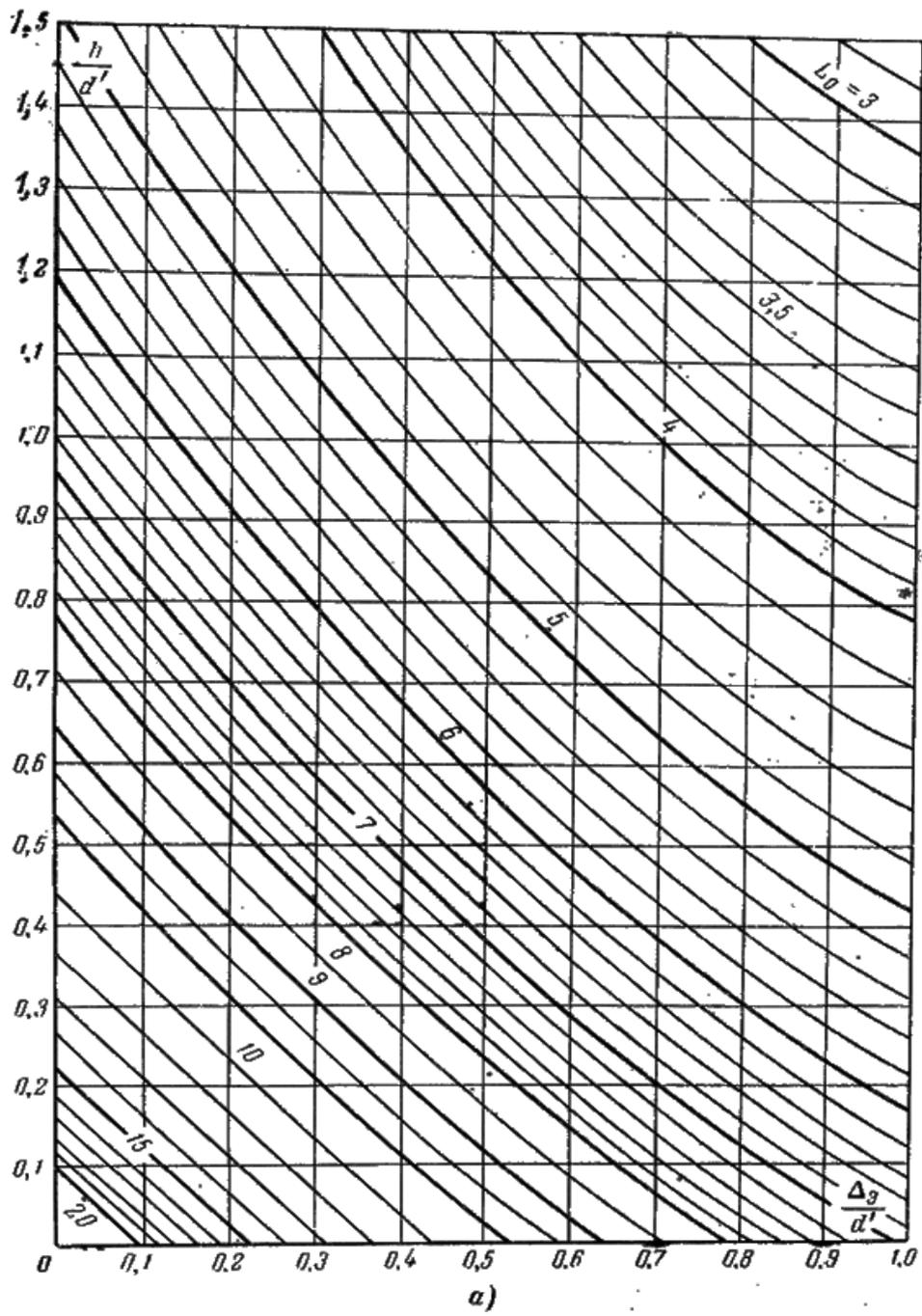


Рис.3 а), Значения функции  $L_0$ .

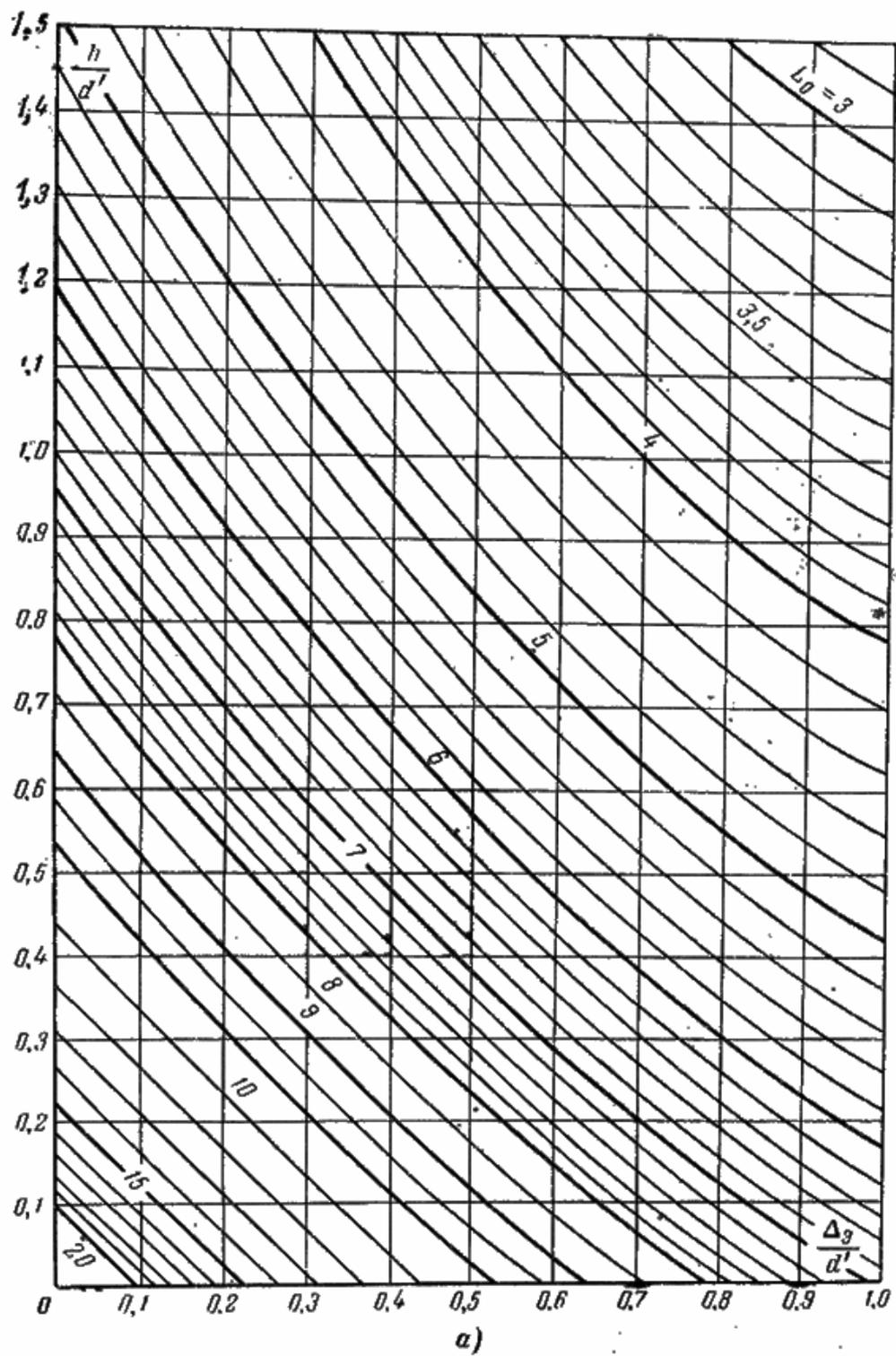


Рис.3 б), Значения функции  $L_0$

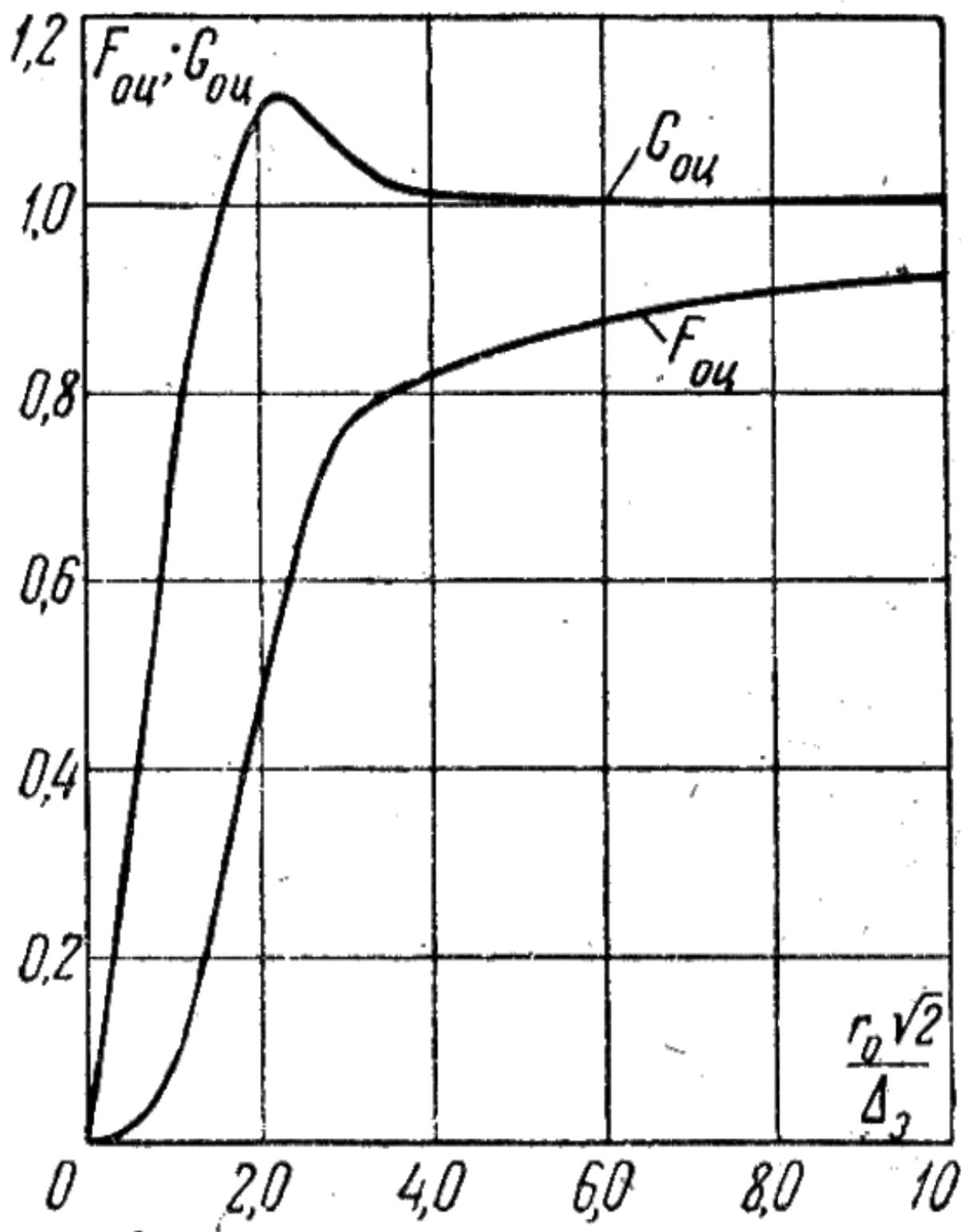


Рис.4 Графики функций  $F_{0u}$  и  $G_{0u}$

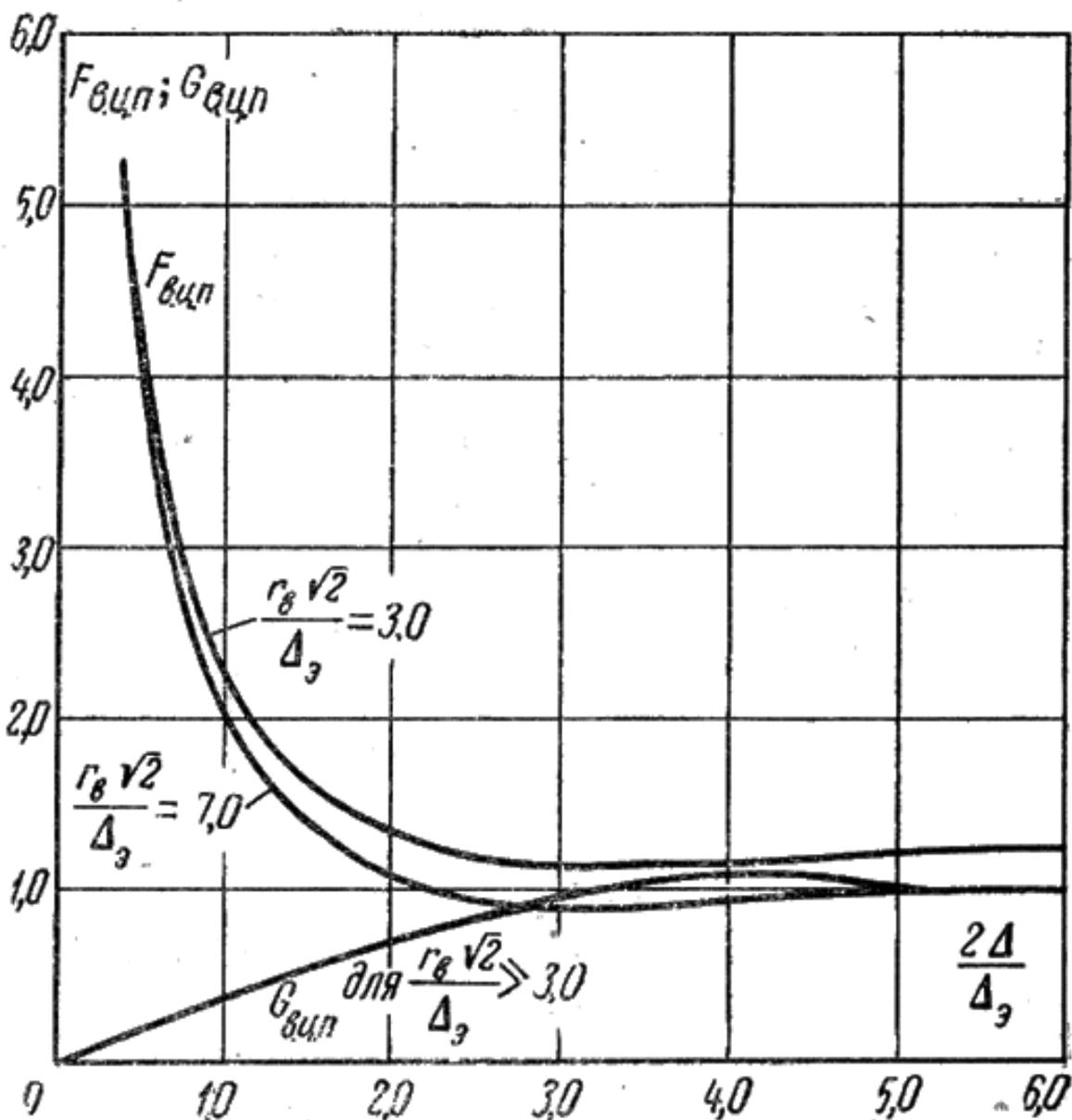


Рис.5 Графики функций  $F_{вцп}$  и  $G_{вцп}$

## 2. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАСЧЁТА ИНДУКЦИОННОЙ ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ

Программа выполнена в таблицах Excel. Последовательность вычислений соответствует изложенной методике.

После ввода исходных данных для расчёта большинство вычислений происходит автоматически. Однако в некоторых случаях указанных в программе требуется вмешательство расчётчика для ввода данных,

определяемых по графикам расположенным на дополнительных листах программы.

В таблице 1 приведена распечатка электрического расчёта сталеплавильной печи ёмкостью 400 кг.

Электрический расчёт печи ёмкостью 400кг стали.

Таблица 1.

<b>1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЁТА</b>				
Наименование, марка, состав-		сталь углеродистая 45Л		
№№ п/п	ПАРАМЕТР	ОБОЗНАЧЕНИЕ	ВЕЛИЧИНА	РАЗМЕРНОСТЬ
1	Теплосодержание при t разливки	Ci	1416	кДж/кг
2	Удельное сопротивление при t разливки	$\rho_{\text{разл.}}$	0,0000013	Ом*м
3	Форма и средний размер кусков	dш	0,05	м
4	Плотность сплава при t разливки	$\rho_{\text{пл.ж.}}$	7200,00	кг/м <sup>3</sup>
5	Полезная емкость тигля	Gт	400	кг
6	Продолжительность плавки	$\tau_{\text{пл.}}$	1,20	час
<b>2.ОПРЕДЕЛЕНИЕЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ТИГЛЯ И ИНДУКТОРА</b>				
№№ п/п	ПАРАМЕТР	ОБОЗНАЧЕНИЕ	ВЕЛИЧИНА	РАЗМЕРНОСТЬ
1	Полезный объем тигля	Vт	0,056	м <sup>3</sup>
2	Отношение диаметра тигля к его глубине	d/h =A	0,80	
3	Средний диаметр тигля	d	0,38	м
4	Полезная глубина тигля	h	0,48	м
5	Средняя толщина стеки тигля	$\Delta_{\text{ст}}$	0,06	м
6	Толщина обмазки индуктора	$\Delta_{\text{об.}}$	0.007	м
7	Внутренний диаметр индуктора	D	0,52	м
7	Высота индуктора	$h_{\text{и}}=1,2*h$	0,58	м
<b>3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ПЕЧИ</b>				
№№ п/п	ПАРАМЕТР	ОБОЗНАЧЕНИЕ	ВЕЛИЧИНА	РАЗМЕРНОСТЬ
1	Активная мощность в садке при $\eta_{\text{терм.}}=0,8$	Pac	164	кВт
2	Частота тока в индукторе не менее	f	2 361	Гц
	принято=		2400	Гц
3	Глубина проникновения тока в садку	$\Delta_{\text{эс}}$	0,01	м
4	Аргумент функций F <sub>оц</sub> и G <sub>оц</sub>	$r*1,41/\Delta_{\text{эс}}$	23,12	
5	Функция F <sub>оц</sub> (по рис.4)		1	
6	Функция G <sub>оц</sub> (по рис.4)		1	
8	Средний электрический диаметр садки	d'	0,37	м
9	Аргумент d1/h	d'/h	0,78	
10	Аргумент h <sub>и</sub> /h	h <sub>и</sub> /h	1,2	
11	Аргумент h/d1	h/d'	1,29	
12	Аргумент $\Delta_{\text{эс}}/d1$	$\Delta_{\text{эс}}/d'$	0,031	
13	Аргумент D/h <sub>и</sub>	D/h <sub>и</sub>	0,899	
14	Выражение (h <sub>и</sub> /h)*M <sub>о</sub> (по рис.2)	(h <sub>и</sub> /h)*M <sub>о</sub>	1,35	

15	Функция $L_0$ (по рис.3)	$L_0$	5,5	
16	Аргумент $k_s$	$k_s$	0,94	
17	Множитель мощности садки	$\sqrt{\rho_c \cdot \mu \cdot f}$	0,06	
18	Множитель мощности индуктора	$\sqrt{\rho_u \cdot f}$	0,01	
19	Настил тока в индукторе	$(Iw_{1,0})$	53992	Ав/м
20	Активная мощность в садке при $f=2400$ Гц, $F_{oc}=1$	$P_{ac}(2400)$	164	кВт
21	Реактивная мощность в садке	$P_{sq}$	164	кВАр
22	Глубина проникновения тока в индуктор	$\Delta_{zu}$	0,00145	м
23	Толщина стенки трубки индуктора ( $\Delta_{tr} > 1,3\Delta_{zi}$ )	$\Delta_{mp}$	0,002	м
24	При выбранной $\Delta_{tr}$ $F_{вцп}$ и $G_{вцп}$ по рис.5	$F_{вцп}$ и $G_{вцп}$	1	
25	Введите $k_{з.и.}$ (ориентировочно -0,8)	$k_{з.и.}$	0,8	
27	Активная мощность в индукторе	$P_i$	47	кВт
28	Реактивная мощность в индукторе	$P_{iq}$	47	кВАр
29	Реактивная мощность в зазоре	$P_{zq}$	2516	кВАр
30	Общая активная мощность	$P$	211	кВт
Выбираем преобразователь ВЧПП - 250-2400 $P=250$ кВт $f=2400$ $U=800/1600$ В, $I=312/156$ А				
	Подключаем на $U=$		800	
31	Общая реактивная мощность	$P_q$	2727	кВАр
32	Полная мощность системы индуктор - садка	$P_s$	2735	кВа
34	Ток в индукторе	$I_{oi}$	3419	А
35	Число витков на 1м высоты	$w_{1,0}$	15,79	в/м
36	Число витков индуктора	$w$	9	в
37	Ёмкость батареи конденсаторов	$C$	282,7	мкФ
38	Естественный $\cos\varphi$	$\cos\varphi$	0,077	
39	Мощность батареи конденсаторов		2727	кВАр
40	Мощность потерь в батарее конденсаторов	$P_{пот.кон}$	7	кВт
41	Потери в токоподводе	$P_{пот.т.п.}$	8	кВт
41	КПДэл.	КПДэл.	0,73	
42	Общий КПД	КПДобщ.	0,58	
43	Теоретический КПДэл (для бесконечнодлинной Системы)	КПДэл.Теор.	0,82703	

### 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Скопировать программу электрического расчёта печи в свою папку.
2. По созданной копии изучить программу электрического расчёта печи на имеющемся в программе примере.
3. Провести расчеты по предложенным преподавателем вариантам.

4. Построить графики зависимости электрического КПД от варьированного параметра.

5. Сделать общие выводы по работе.

Список использованной литературы

1 *Вайнберг А. М.* Индукционные плавильные печи.- М.: Машгиз, 1967.- 415с.

2. *Бабат Г.И.* Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение.- М - Л.: Государственное энергетическое издательство, 1946. – 431 с.

*Учебное издание*

**Маляров** Аркадий Ильич  
**Минаев** Алексей Алексеевич  
**Миронов** Алексей Сергеевич

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ИНДУКЦИОННЫХ ТИГЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ**

*Под редакцией авторов  
Оригинал-макет подготовлен редакционно-издательским отделом*

*МГТУ «МАМИ»*

По тематическому плану внутривузовских изданий учебной литературы  
на 2010г.

Подписано в печать 05.02.2010 формат 60х90 1/16. Бумага 80г/м<sup>2</sup>  
Гарнитура «Таймс». Ризография. Усл. печ. л. 1.  
Тираж 30 экз. Заказ № 4-10

МГТУ «МАМИ»

107023, г. Москва, Б. Семёновская ул., 38