

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

**Հարությունյան Աննա Մարտինի**

**ՄԵՏԱՂՆԵՐԻ ՀԱԼԵՑՄԱՆ ԿԱՏԱՐԵԼԱԳՈՐԾՎԱԾ ԻՆԴՈՒԿՑԻՈՆ  
ԷԼԵԿՏՐԱՏԵՂԱԿԱՅԱՆՔԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ**

Ե.09.01 – «Էլեկտրատեխնիկա, էլեկտրամեխանիկա, էլեկտրատեխնոլոգիաներ»  
մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական  
աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

Երևան 2018

---

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

**Арутюнян Анна Мартыновна**

**РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ ИНДУКЦИОННОЙ  
ЭЛЕКТРОУСТАНОВКИ ДЛЯ ПЛАВКИ МЕТАЛЛОВ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.09.01 – “Электротехника, электромеханика, электротехнологии”

Ереван 2018

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի ազգային  
պոլիտեխնիկական համալսարանում (ՀԱՊՀ)

Գիտական ղեկավար՝

տ.գ.դ. Ժ.Դ. Դավիդյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

տ.գ.դ. Բ.Մ. Մամիկոնյան  
տ.գ.թ. Վ.Վ. Մարգարյան

Առաջատար կազմակերպություն՝

«Էներգետիկայի գիտահետազոտական  
ինստիտուտ» ՓԲԸ

Պաշտպանությունը կայանալու է 2018թ. ապրիլի 16-ին, ժամը 15<sup>00</sup>-ին  
Հայաստանի Ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում գործող 038  
մասնագիտական խորհրդի նիստում (0009, Երևան, Տերյան փող., 105):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ գրադարանում:  
Սեղմագիրն առաքված է 2018թ. մարտի 15-ին

Մասնագիտական խորհրդի  
Գիտական քարտուղար, տ.գ.դ.՝



Գ.Վ. Բարեղամյան

---

Тема диссертации утверждена в Национальном политехническом университете  
Армении (НПУА)

Научный руководитель:

д.т.н. Ж.Д. Давидян

Официальные оппоненты:

д.т.н. Б.М. Мамиконян  
к.т.н. В.В. Маргарян

Ведущая организация:

ЗАО «Научно-исследовательский институт энергетики»

Защита диссертации состоится 16-го апреля 2018г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании  
Специализированного совета 038, действующего при Национальном политехническом  
университете Армении, по адресу: 0009, Ереван, ул. Теряна, 105.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА.

Автореферат разослан 15-го марта 2018г.

Ученый секретарь

Специализированного совета, д.т.н.



Г.В. Барегамян

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Электрические способы нагрева и плавки металлов имеют значительные преимущества перед огневыми способами, т.к. при этом уменьшаются потери энергии, сокращаются отрицательные экологические воздействия на окружающую среду за счёт исключения выбросов продуктов сгорания органического топлива, снижаются перегревы, технологический процесс более управляем, может быть автоматизирован и пр.

Наибольшее распространение для электроплавки металлов получили следующие способы и установки индукционного нагрева: высокочастотные тигельные и низкочастотные (50 Гц) канальные.

Индукционные установки для плавки металлов охватывают диапазон мощностей от единиц киловатт до десятков мегаватт и диапазон частот – до десятков килогерц.

В настоящее время резко увеличивается потребность в установках малых мощностей порядка нескольких киловатт, которые являются также предметом частного предпринимательства.

Конструкции и электрические схемы маломощных установок значительно отличаются от мощных установок – как по предъявляемым к ним техническим требованиям, так и по техническим решениям. Для установок малых мощностей актуальны повышенные требования по технологическим и экономическим характеристикам, более жесткие требования экологического характера – по уменьшению искажений формы кривой напряжения питающей электрической сети, снижению высокочастотных радиопомех, в том числе – в частотном диапазоне сотовой телефонной связи. Актуальность указанных требований объясняется следующим:

- ✓ маломощные установки получили развитие и распространение в относительно последнее время и недостаточно совершенны;

- ✓ маломощные установки имеют явно выраженную специфику технико-экономического характера, однако на них традиционно распространяют подходы и технические решения, свойственные мощным установкам, что является необоснованным и дает отрицательные результаты;

- ✓ традиционно отдается предпочтение высокочастотным тигельным установкам (ВЧТУ), что не вполне обосновано в случае маломощных установок;

- ✓ существующие низкочастотные канальные установки (НЧКУ), обладая принципиальными достоинствами вследствие использования промышленной частоты 50 Гц (без высокочастотного преобразования), в то же время имеют существенные недостатки конструктивного характера, затрудняющие их усовершенствование;

- ✓ маломощные установки являются объектами индивидуального производства и частного предпринимательства, для которых экономические характеристики более предпочтительны.

Однако указанным вопросам в установках малой мощности не уделяется достаточного внимания.

Областью исследований в настоящей работе являются установки малой мощности – до нескольких киловатт, предназначенные для малосерийного и индивидуального производства.

### Цель и задачи работы

Целью диссертационной работы является:

- ✓ разработка электрических установок для плавки металлов малой мощности с высокой технологической эффективностью;
- ✓ разработка и исследование усовершенствованной маломощной установки с высокими экономическими и эксплуатационными характеристиками;
- ✓ разработка и исследование соответствующих методов исследования и расчета.

Для достижения указанной цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

- ✓ обоснование того положения, что электроиндукционные установки для плавки металлов малой мощности целесообразно выполнять по принципу НЧКУ с питанием непосредственно от промышленной сети частотой  $50 \text{ Гц}$ ;
- ✓ разработка конструкции НЧКУ, исключая недостатки существующих канальных установок (на уровне патента на изобретение);
- ✓ разработка и исследование математической модели НЧКУ с целью обеспечения заданных требований;
- ✓ разработка методики и программы расчёта маломощной НЧКУ, обеспечивающей высокую точность и адекватность с реальным процессом;
- ✓ создание опытно-экспериментального образца усовершенствованной НЧКУ малой мощности и проведение его исследований и испытаний.

### **Научная новизна**

1. Разработана концепция создания установок для плавки металлов малой мощности, суть которой: установки канального вида, частота электропитания непосредственно от промышленной сети, использование всего объема металла для выделения тепла; результат – максимальные производительность, надежность и коэффициент полезного действия (КПД),
2. Разработаны конструкция канальной печи с погруженным в металл магнитопроводом индуктора, размеры ванны (конструкция защищена патентом на изобретение) и метод расчета.
3. Предложена динамическая математическая модель теплоэлектрических процессов канальной установки, обеспечивающая расчет, адекватный протекающему процессу, разработана система автоматического управления.
4. С использованием программного пакета MatLab разработан метод расчета теплоэлектрических процессов предложенной НЧКУ.

**Объекты исследования.** Исследования проводились на опытно-экспериментальном образце НЧКУ с погруженным в металл магнитопроводом индуктора мощностью  $2 \text{ кВт}$  и на динамической математической модели теплоэлектрических процессов разработанной НЧКУ.

### **Методы исследования**

1. Математические и физические методы исследования, принятые для электрических и электротермических процессов.
2. Метод пошагового расчета, адекватный реально протекающему процессу. На каждом шаге расчета вычисляются все электрические и тепловые параметры, которые сопоставляются с заданными параметрами. По завершении процесса расплавления вычисляются затраченная энергия, время протекания процесса, производительность, КПД, а также функция регулирования регулятора напряжения.
3. Метод испытания опытно-экспериментального образца установки в реальных технологических режимах.

### **Практическая ценность и реализация результатов**

1. Разработанная усовершенствованная конструкция НЧКУ, ее схематические решения, математическая модель установки и технологического процесса плавки, методы исследования и расчета обеспечивают высокую эффективность предложенной установки относительно существующих конструкций.

2. Результаты работы подтверждают возможность и целесообразность исполнения электроиндукционных установок для плавки металлов малой мощности по принципу канальных установок низкой частоты (50 Гц) при питании непосредственно от промышленной сети.

3. Предложенные технические решения реализованы на опытно-промышленном образце установки. Разработанные математические модели и методы исследования и расчета рекомендуются для использования в инженерной практике.

4. Результаты работы использованы в разработках "ИП Э. Манукян", ООО "Ехбайрнер Маргарян", ООО "Никол Думан". Акты о внедрении результатов работы прилагаются к диссертационной работе.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Концепция создания установок для плавки металлов малой мощности.

2. Конструкция и метод расчета высокопроизводительной НЧКУ с погруженным в металл магнитопроводом индуктора.

3. Динамическая математическая модель теплоэлектрических процессов предложенной НЧКУ, метод расчета и исследования.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано десять научных трудов, в том числе получены два патента на изобретение.

**Апробация результатов работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедр "Электроэнергетика", "Электрические машины и аппараты" (2017г.) и годичных конференциях НПУА (2016-2017гг.).

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы из 100 наименований, а также 4 приложений. Основной текст составляет 126 страниц, в том числе 38 рисунков и 14 таблиц. Диссертация написана на армянском языке.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи, представлены научная новизна, методы и объекты исследования, практическая ценность работы, основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** дается обзор индукционных электроустановок для плавки металлов. Наибольшее распространение получили принципиально отличные классы установок: **индукционные высокочастотные тигельные установки без магнитопровода**, где выделение тепла происходит от протекания наведённых вихревых токов в металле, помещённом в тигель, а также в самом тигле, и **низкочастотные (50 Гц) канальные установки** с магнитопроводом, где выделение тепла происходит от омического нагрева током, протекающим в короткозамкнутом витке, образованном массой металла, находящегося в непроводящей ванне.

На рис. 1 представлены схематические изображения электрических печей индукционной плавки металлов - индукционной тигельной (а) и канальной (б) печей, где приняты обозначения: 1 – индуктор, 2 – расплав, 3 – футерованный кольцевой канал, 4 – магнитопровод, 5 – огнеупорный тигель).

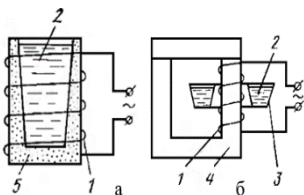


Рис. 1. Схематические изображения электрических печей индукционной плавки металлов: а – тигельная печь, б – канальная печь

**Индукционные высокочастотные тигельные установки.** При протекании в массе металла переменного тока, вследствие явления поверхностного эффекта, происходит вытеснение тока к поверхности проводника. Уменьшение плотности тока от поверхности в глубь проводника происходит по экспоненциальному закону:

$$\delta_x = \delta_0 e^{-x/\Delta}, \quad (1)$$

где  $\delta_x$  – плотность тока на расстоянии  $x$  от поверхности;  $\delta_0$  – плотность тока на поверхности проводника;  $e$  – основание натурального логарифма;  $\Delta$  – глубина проникновения тока, характеризующая степень затухания магнитного поля в металле, по мере проникновения его вглубь.

Теория электромагнитного поля дает следующее выражение для глубины проникновения тока  $\Delta$ :

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \gamma}}, \quad (2)$$

где  $\omega$  – круговая частота, характеризующая электромагнитное поле;  $\mu$  и  $\gamma$  – магнитная проницаемость и электропроводность металла.

Почти вся поглощаемая энергия выделяется в слое металла, толщина которого равна глубине проникновения тока. Частота тока, подводимого к нагрузке, определяет основные технологические параметры: глубину проникновения тока, напряжение и мощность, передаваемые в нагрузку, соответственно температуру и интенсивность нагрева, производительность, запас коммутационной устойчивости, КПД. С уменьшением ёмкости печи необходимая частота возрастает, достигая величин порядка десятков и сотен килогерц. Токи в индукторе достигают величин сотен (у печей малой ёмкости) и тысяч ампер при средней плотности тока до  $20 \text{ А/мм}^2$ . Электрические потери в индукторе достигают 20...30% полезной мощности печи. Теоретически максимальная величина КПД составляет 0,68. Коэффициент мощности системы “индуктор – нагрузка” зависит от величины воздушного зазора между индуктором и металлом, электрофизических свойств нагреваемого металла, частоты тока, геометрии индуктора и находится в пределах  $\cos \varphi = 0,08 \dots 0,25$ .

Приводятся характеристики промышленных ВЧТУ: **достоинства** – высокая производительность, возможность полного слива расплавленного металла; **недостатки** – высокая частота тока в индукторе и связанные с ним проблемы, критичность к перегрузкам и колебаниям напряжения питающей сети вследствие ограниченной коммутационной устойчивости инверторных преобразователей, высокий уровень высокочастотных помех, низкий КПД.

**Индукционные низкочастотные (50 Гц) канальные установки.** Современная конструкция канальной печи представлена на рис. 2 (где приняты обозначения: 1 – подовый камень, 2 – плавильный канал, 3 – магнитопровод, 4 – индуктор, 5 – ванна

печи, 6,7 – уровень расплавленного металла соответственно, после и до слива полезной массы загрузки, 8 – крышка, 9 – сливной носок, 10 – ось вращения печи, 11 – трос к механизму наклона печи, 12 – направления движения расплава, обусловленного электромагнитными силами в канале, К – зона максимальной температуры металла).

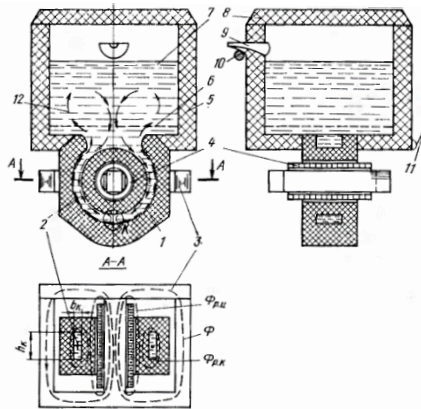


Рис. 2. Индукционная каналная печь для плавки металлов

Основной магнитный поток наводит в металле канала электродвижущие силы (ЭДС). ЭДС создает ток, который нагревает металл в канале. Тепло, выделяемое в кольцевом канале, расплавляет металл. КПД достигает 75...90% и не зависит от заполнения печи расплавом; величина КПД, в отличие от индукционных тигельных установок, принципиально не ограничена. Коэффициент мощности индукционной каналной печи относительно высок (0,4...0,8). Канальные печи дешевле по капитальным вложениям.

Приводятся характеристики промышленных НЧКУ: достоинства – использование низкой частоты промышленной сети 50 Гц, высокий электрический КПД, низкий уровень высокочастотных помех, недостатки – сложность конструкции, тяжелые условия работы каналов, недопущение опорожнения каналов, ограниченная область использования – в основном для плавки цветных металлов и сплавов, а также в качестве миксеров и раздаточных устройств.

По основным энергетическим параметрам: составу оборудования, установленной мощности, коэффициенту мощности, КПД, удельному расходу электроэнергии, перегрузочной способности, НЧКУ имеют преимущества перед ВЧТУ.

Учитывая особенности и сравнительные характеристики мощных ВЧТУ и НЧКУ, в качестве принципиального варианта исполнения установок малой мощности, предлагаемых и исследуемых в настоящей работе, принимается принцип НЧКУ с усовершенствованием их конструкции. Основные преимущества такого исполнения: использование тока промышленной частоты 50 Гц без частотного преобразования; исключение проблем, связанных с использованием высокой частоты; в том числе принципиальное снижение (вплоть до исключения) радиопомех; абсолютная коммутационная устойчивость тиристорного регулятора напряжения (при необходимости его использования); возможность непосредственного подключения к промышленной сети без регулирования напряжения, высокий, теоретически

неограниченный КПД.

**Во второй главе** излагается новая концепция создания НЧКУ для плавки металлов малой мощности, представлены результаты разработки низкочастотной (50 Гц) установки (на уровне патента на изобретение), исключающей недостатки известных канальных установок, приводятся разработанная математическая модель теплоэлектрических процессов НЧКУ и метод её исследования.

Известные НЧКУ имеют принципиальный недостаток – канал отделен от объема ванны, расплавление металла происходит только в канале. Основная масса металла (шихты), которая находится в ванне, не участвует в активном процессе плавления. Расплавленный металл из канала естественным образом перетекает в ванну, а шихта постепенно перемещается в канал и там расплавляется. Такой теплодинамический процесс приводит к снижению КПД, увеличению времени, необходимого для расплавления, и соответственно – снижению производительности установок.

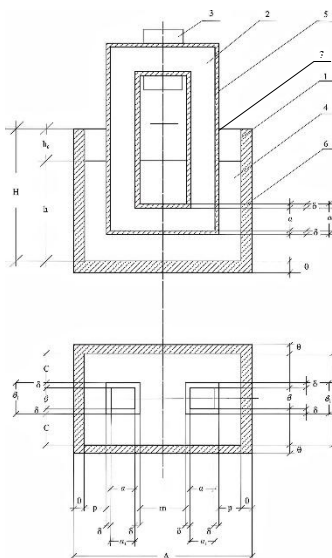


Рис. 3. Общий вид предложенной канальной печи

Предлагается конструкция НЧКУ, защищенная патентом на изобретение (рис. 3, где 1 – плавильная ванна, 2 – магнитопровод индуктора, 3 – первичная катушка, 4 – шихта, 5 – теплоизоляция магнитопровода, 6 – теплоизоляция ванны, 7 – теплоизолирующая крышка) [1], исключающая недостатки существующих канальных установок.

Отличие предлагаемой канальной установки от существующих заключается в том, что вся масса металла в ванне охватывает погруженный магнитопровод индукционного трансформатора, и, таким образом, весь металл, находящийся в ванне, является вторичным короткозамкнутым витком, где происходит тепловыделение и одновременно расплавление всей массы металла. Такая конструкция позволяет повысить производительность установки и КПД, надежность обмотки и установки в целом, а также удалить первичную обмотку индукционного трансформатора из

нагретой зоны. Выполненные расчеты и сопоставление производительностей предлагаемой (рис. 3) и существующей конструкций (рис. 2), выраженных объемами металла, где выделяется тепловая мощность для расплавления, при канальной печи одинаковом полном объеме загруженного металла, показывают, что производительность предлагаемой канальной печи превосходит производительность существующей конструкции в 21,7 раза. Естественно, что при этом потребляемая мощность, забираемая от сети, будет соответствовать производительности.

Магнитопровод предлагаемой канальной печи подвержен непосредственному тепловому воздействию расплавленного металла, что оказывает влияние на магнитные характеристики магнитопровода. Как известно, при нагреве магнитопровода до температуры магнитных превращений (температуры фазового перехода) – точки Кюри, которая для стали равна  $T_K=768$  °С, величина магнитной проницаемости скачкообразно падает до величины, равной магнитной проницаемости вакуума  $\mu=1$ , и при этом магнитопровод теряет свои магнитные качества. Это означает, что температура магнитопровода в процессе расплавления должна быть не более точки Кюри, то есть при плавке металлов, температура плавления которых ниже 768 °С (олово, свинец, цинк, алюминий), магнитопровод может использоваться без теплоизоляции с непосредственным погружением в расплав; а при плавке металлов, температура плавления которых выше 768°С (медь), магнитопровод может использоваться с теплоизоляцией, обеспечивающей температуру магнитопровода не более 768 °С.

Введено понятие коэффициента активного объема печи  $k_a$  – отношение объема металла, в котором выделяется тепло ( $V_a$ ), ко всему объему металла в ванне ( $V_m$ ):  $k_a=V_a/V_m$ . Чем больше коэффициент  $k_a$ , тем выше удельная производительность  $Q_o$  и меньше удельное время плавки  $T_o$ , а также выше КПД. Коэффициент  $k_a$  определяется степенью использования сечения короткозамкнутого витка металла при протекании тока, что, в свою очередь, определяется глубиной проникновения тока в сечении короткозамкнутого витка. Поверхностный эффект, который определяет глубину проникновения тока, достаточно сильно выражен и при частоте 50 Гц, учитывая большое сечение короткозамкнутого витка металла. Коэффициент  $k_a$  уменьшается с увеличением сечения короткозамкнутого витка. Таким образом, для достижения максимальной удельной производительности и высокого КПД необходимы вполне определенная конфигурация и размеры канальной печи, а следовательно, и ее номинальная емкость.

Разработана “типовая” конструкция канальной печи с определенными геометрическими размерами (рис. 4, где 1 – плавильная ванна, 2 – магнитопровод индуктора, 3 – первичная катушка, 4 – шихта). Основной размер для типовой конструкции печи принят 50 мм, при этом: 1) сечение магнитопровода индукторного трансформатора – квадратной формы с размерами сторон 50 x 50 мм; 2) удаление магнитопровода от стенок и дна ванны и от верхнего уровня металла равно основному размеру – 50 мм, сечение короткозамкнутого витка и в горизонтальной, и в вертикальной проекциях равно 50 x 50 мм. Указанные условия определяют размеры ванны, магнитопровода и высоты загрузки канальной печи предложенной конструкции.

С целью определения сравнительных показателей проведен расчет при плавлении в указанной типовой канальной печи различных металлов: олова, цинка, алюминия и меди.

На рис. 4б на горизонтальной проекции заштрихована та часть сечения короткозамкнутого витка, по которому протекает ток. В случае плавления в типовой

печи олова и цинка, учитывая глубину проникновения тока, ток практически протекает по всему сечению. Соответственно, имеют место лучшие технико-экономические характеристики. На рис. 4в схематически показана (заштрихована) та часть сечения короткозамкнутого витка, по которому протекает ток в случае плавления в типовой печи алюминия и меди – вследствие меньшей глубины проникновения ток протекает по периферийной части сечения.

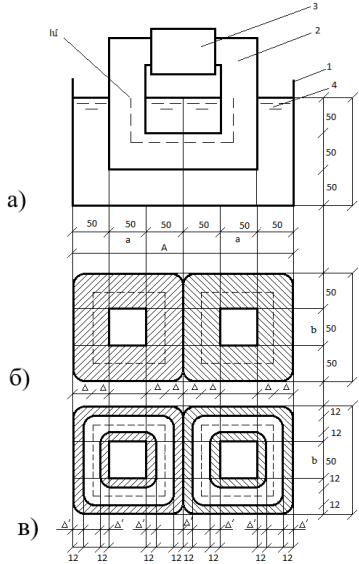


Рис. 4. Общий вид, вырез “типовой” канальной печи (а), проекции глубины проникновения тока при плавнении олова (б) и алюминия (в)

Результаты расчета приведены в табл. 1.

На основании результатов расчета можно сделать следующие выводы.

1. Размеры, емкость, производительность и КПД “типовой” канальной печи определяются основным размером  $a$ .

2. Экономичный режим плавнения с высокой производительностью и высоким КПД обеспечивается для тех металлов, двойная глубина проникновения тока которых при частоте  $50 \text{ Гц}$  соизмерима с основным размером типовой конструкции.

3. Глубины проникновения тока в стационарном режиме при плавнении олова, цинка (в несколько меньшей степени – алюминия, меди) соизмеримы и удачно вписываются в основной размер,  $a=50 \text{ мм}$ . Плавнение этих металлов наиболее целесообразно в указанных канальных печах малой мощности.

4. Увеличение размеров и изменение конфигурации канальной печи относительно “типовой” конструкции, конфигурация и размеры которой показаны на рис. 4, приведут к снижению показателей удельной производительности, КПД и времени нагрева.

Канальная установка может быть выполнена по следующим двум вариантам структурной схемы (рис. 5).

Таблица 1

Наименование параметров	Расплавляемый металл			
	олово	цинк	алюминий	медь
Основной размер печи $a$ , мм	50	50	50	50
Объем металла в ванне $V_m$ , см <sup>3</sup>	6000	6000	6000	6000
Удельная масса металла $g$ , г/см <sup>3</sup>	7,29	7,13	2,7	8,96
Емкость печи $G$ , кг	43,7	42,8	16,2	53,8
Удельное сопротивление при температуре 20 °С, Ом. мм <sup>2</sup> /м	0,12	0,059	0,028	0,0175
Температура плавления $t_p$ , °С	231,9	419,5	660,6	1084,5
Глубина проникновения тока при температуре 20 °С $\Delta_o$ , мм	24,6	17,3	11,9	9,41
Глубина проникновения тока при температуре плавления $\Delta_p$ , мм	33,4	27,6	22,3	21,4
Сечение короткозамкнутого витка $S_s$ , мм <sup>2</sup>	20000	20000	20000	20000
Активное сечение короткозамкнутого витка $S_a$ , мм <sup>2</sup>	20000	20000	17840	17120
Сопротивление короткозамкнутого витка металла $R$ , мОм	4,8	4,1	3,3	3,1
Коэффициент активного объема печи $k_a$	1	1	0,892	0,856
Удельная теплота плавления $q_p$ , кВт.ч/кг	0,0165	0,0314	0,11	0,0596
Мощность плавления $P$ , кВт	2,08	2,44	3,03	3,22
Время плавления $T_m$ , час	0,347	0,55	0,59	0,996
мин	21	33	35	60
Удельная производительность $G_p$ , кг/мин	2,08	1,3	0,46	0,9

Вариант 1. Промышленная сеть – промежуточный трансформатор – тиристорный регулятор напряжения с фазовым управлением – индукторный трансформатор – плавильная печь. Частота питания индуктора – 50 Гц.

Вариант 2. Промышленная сеть – промежуточный трансформатор – регулятор напряжения в виде контакторного переключателя отпаек промежуточного трансформатора – индукторный трансформатор – плавильная печь. Частота питания индуктора – 50 Гц.

Управление процессом плавки выполняется регулированием величины напряжения, подаваемого на первичную обмотку индукторного трансформатора, либо по потребляемой мощности, например, в режиме постоянной мощности  $P=const$  (воздействие на вход регулятора по каналу  $P$ ), либо по температуре в ванне (воздействие по каналу  $t$ ). Регулирование может выполняться автоматически или вручную (воздействие по каналу  $U$ ). Процесс может быть нерегулируем в режиме постоянного напряжения  $U=const$ .

На примере предложенной конструкции излагается новая концепция создания НЧКУ для плавки металлов малой мощности, суть которой: установки канального вида, частота электропитания – 50 Гц непосредственно от промышленной сети, использование всего объема металла для выделения тепла; результат – максимальные производительность, надежность и КПД.

Разработана динамическая математическая модель теплоэлектрических процессов предложежной НЧКУ, состоящая из подмоделей электрических и тепловых процессов.

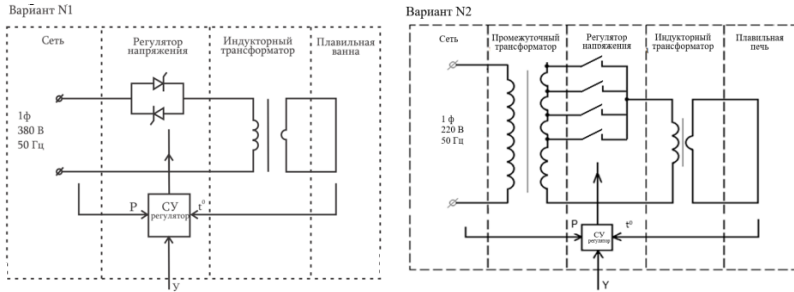


Рис. 5. Структурные схемы НЧКУ

Математическая модель электрических процессов описывает составные части установки – плавильную ванну, индукторный трансформатор, устройство электропитания (тиристорный регулятор напряжения), а также связи параметров: геометрические размеры ванны, массу и характеристики шихты (размеры частиц, состояние поверхности частиц, удельное электрическое сопротивление металла), динамическое омическое сопротивление шихты и расплава (изменение сопротивления в процессе нагрева и плавки), электрическую мощность, параметры индукторного трансформатора, напряжение и параметры питающего сетевого трансформатора, продолжительность плавления, КПД, угол управления тиристорным регулятором и глубину регулирования.

Расчет выполняется по действующим значениям первой гармонической электрической величины с целью определения конструктивных параметров, а также использования их в модели тепловых процессов.

#### Модель N1 – плавильной ванны

Исходное активное сопротивление короткозамкнутого витка металла  $R_x$  выражено через заданные геометрические размеры ванны, индуктора, высоту заполнения ванны металлом и удельное сопротивление металла в холодном состоянии ( $15^\circ\text{C}$ ):

$$R_x = K_a \frac{R_c R_{y1} R_{y2} R_g}{2(R_{y1} R_{y2} R_g + R_c R_{y2} R_g + R_c R_{y1} R_g + R_c R_{y1} R_{y2})}. \quad (3)$$

Однако динамическое удельное сопротивление металла и, соответственно, полное сопротивление короткозамкнутого витка в процессе нагрева и плавления резко меняются по следующим причинам.

1. Повышение температуры металла в процессе нагрева приводит к увеличению его удельного сопротивления.

2. Шихта, загружаемая в ванну для нагрева, обычно представляет собой лом кусков металла различных размеров. Активное сопротивление шихты определяется размерами кусков металла и состоянием их контактируемых поверхностей. По мере плавления шихта постепенно переходит в монолитное состояние, уменьшаются сопротивления контактируемых поверхностей и длины пути прохождения тока. Соответственно, в процессе плавления сопротивление шихты постепенно уменьшается и становится при полном расплавлении, равным сопротивлению монолитного металла.

Динамическое удельное и полное сопротивления, подверженные указанным изменениям, можно выразить следующим образом.

Технологический процесс плавления металла, помещенного в плавильную ванну, состоит из этапов нагрева и плавления. Графики изменения температуры и сопротивления в процессе нагрева и плавления металла приведены на рис.6.

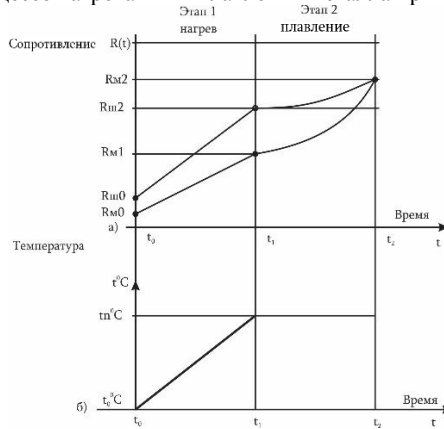


Рис. 6. Изменение температуры (б) и сопротивления (а) металла в процессе нагрева и плавления

Этап 1. Нагревание металла. В процессе нагрева с повышением температуры шихты соответственно увеличивается электрическое сопротивление металла:

$$R_t = R_0[1 + \alpha(t - t_0)], \quad (4)$$

где  $R_0$ ,  $R_t$  – сопротивления короткозамкнутого витка металла, соответственно при начальной температуре  $t_0$  и температуре  $t$ .

Если предположить, что в ванне находится монолитный металл, то сопротивления короткозамкнутого витка металла в начале и в конце этапа 1 будут соответственно:

$$R_{m0}, R_{m1} = R_{m0}[1 + \alpha(t_n - t_0)], \quad (5)$$

где  $R_{m0}$ ,  $R_{m1}$  – сопротивления короткозамкнутого витка металла соответственно при начальной температуре  $t_0$  и температуре плавления  $t_n$  (рис. 6а).

В случае, если металл не монолитен, а заполняет объем в виде лома, т.е. в виде шихты, объем которой превосходит объем монолитного металла, то сопротивления короткозамкнутого витка металла в начале и в конце этапа 1 будут, соответственно:

$$R_{ш0}, R_{ш1} = R_{ш0}[1 + \alpha(t_n - t_0)], \quad (6)$$

где  $R_{ш0}$ ,  $R_{ш1}$  – сопротивления короткозамкнутого витка металла шихты соответственно при температурах  $t_0$  и  $t_n$  (рис. 6а).

Сопротивление шихты выше, чем сопротивление монолитного металла вследствие большей длины пути прохождения тока по кускам металла произвольной формы и наличия контактного сопротивления. Указанное увеличение сопротивления определяется объемным коэффициентом  $k_o$ , который представляет собой кратность увеличения электрического сопротивления в случае, если металл не монолитен, а заполняет объем в виде лома, т.е. в виде шихты:

$$R_{iu} = k_o R_m. \quad (7)$$

Коэффициент  $k_o$  выражается через относительный объем шихты, принимая, что чем больший объем занимает шихта при заданной массе металла, т.е. чем больше куски металла в шихте, тем больше удельное и полное электрические сопротивления.

Относительный объем шихты  $k_{iu}$  представляет собой отношение объема шихты  $V_{iu}$  к объему монолитного металла  $V_m$  той же массы:

$$k_{iu} = \frac{V_{iu}}{V_m}. \quad (8)$$

Объем металла:

$$V_m = \frac{G}{g}, \quad (9)$$

где  $G$  – масса металла;  $g$  – удельная масса металла.

Объем помещенной в ванну шихты  $V_{iu}$  или металла  $V_m$ , можно выразить через размеры ванны и высоту шихты (металла) в ванне, за вычетом объема погруженной части магнитопровода (рис. 3), следующим образом:

$$V = ABh_1 - a_1b_1[2(h_1 - h_4) + m]. \quad (10)$$

Отсюда может быть выражена высота шихты (или металла), т.е. размер  $h_1$ , необходимая для последующего расчета:

$$h_1 = \frac{\frac{V}{a_1b_1} + m - 2h_4}{\frac{AB}{a_1b_1} - 2}. \quad (11)$$

Объем шихты, таким образом, может быть определен посредством измерения высоты заполнения ванны  $h_1$  (рис. 3). Объем металла определяется по его массе (10) или аналогичным образом по (9).

Зависимость коэффициента  $k_o$  от  $k_{iu}$  должна быть определена экспериментально для данного типоразмера печи, выражена аналитически:

$$k_o = F(k_{iu}) \quad (12)$$

и включена в банк исходных данных для использования в расчете.

Сопротивление шихты на этапе нагревания возрастает линейно в соответствии с (4) (рис. 6б). При этом объем шихты не изменяется, т.к. на протяжении этапа 1 текущая температура еще не достигла температуры плавления и плавление не происходит.

Этап 2. Плавление металла. При сообщении шихте тепловой энергии после достижения шихтой температуры плавления  $t_n$  начинается процесс постепенного плавления шихты вплоть до полного ее расплавления. Этап 2 до полного расплавления шихты занимает время от  $t_1$  до  $t_2$  (рис. 6б). На протяжении этапа 2 температура расплава не изменяется. Однако текущее электрическое сопротивление расплава на этапе 2 изменяется по следующим причинам.

1. Удельное электрическое сопротивление расплавленного металла больше, чем удельное сопротивление металла в твердом состоянии, но доведенного до температуры плавления (в рассматриваемом случае – в момент времени  $t_1$ ), примерно в 1,5...2 раза.

2. При плавлении имеет место постепенное уменьшение объема шихты вследствие ее сплавления. При этом, по мере монолитизации металла, уменьшаются сопротивления контактируемых поверхностей кусков шихты и длины пути

прохождения в них тока. Соответственно, в процессе плавления сопротивление шихты постепенно уменьшается и становится при ее расплавлении, равным сопротивлению монокристаллического металла.

Динамика изменения сопротивления на этапе 2 показана на рис. 6а в правой части графика.

В процессе плавки изложенные выше два фактора действуют противоположным образом на изменение величины сопротивления. Причем оба фактора действуют лавинообразно. Соответственно, результирующий процесс будет также носить лавинообразный характер, и изменение сопротивления на этапе 2 плавления будет выражаться единой функцией. Лавинообразный процесс изменения сопротивления шихты при плавлении может описываться функцией степенного многочлена – примерно так, как описывается лавинообразный процесс отпираания полупроводникового диода – его вольтамперная характеристика:

$$R(t) = R_{ul}(a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + \dots + a_nt^n), \quad (13)$$

где  $R(t)$  – сопротивление короткозамкнутого витка металла в момент времени  $t$  на этапе плавления  $t_1 < t < t_2$ ;  $R_{ul}$  – сопротивление короткозамкнутого витка в конце этапа нагревания в момент времени  $t_1$ , когда достигнута температура плавления  $t_n$ ;  $a_1, a_2, \dots, a_n$  – коэффициенты степенного многочлена.

При приближенных расчетах изменение сопротивления короткозамкнутого витка можно принять линейным.

Энергия, необходимая для нагрева и расплавления металла  $W$ , определяется как сумма энергий, необходимой для нагрева массы металла при доведении ее температуры до температуры плавления, и энергии для изменения фазового состояния массы металла до его жидкой фракции – расплавления всей массы металла:

$$W = W_H + W_{II} = q_H G(t - t_0) + q_n \cdot G, \quad (14)$$

где  $W_H$  – энергия, необходимая для нагревания металла массой  $G$  от начальной температуры  $t_0 = 15^\circ\text{C}$  до температуры плавления  $t$ ; для меди  $t = 1083^\circ\text{C}$ ;  $q_n$  – удельная теплоемкость металла;  $W_{II}$  – энергия, необходимая для плавления металла массой  $G$ ;  $q_n$  – удельная теплота плавления металла.

Время всего процесса нагревания и плавки  $T$  определяется в зависимости от режима плавки.

В режиме постоянного напряжения (1) время  $T$  определяется решением интегрального уравнения:

$$W = \int_0^T P(t) dt = \int_0^T \frac{U^2}{R(t)} dt, \quad (15)$$

где  $P(t)$  – функция регулирования мощности по времени из условия обеспечения постоянного напряжения на входе трансформатора,  $U$  – напряжение в контуре короткозамкнутого витка.

В режиме постоянной мощности время  $T$  и производительность процесса определяются уравнениями:

$$T = \frac{W}{P}, \quad M = \frac{G}{T}, \quad (16)$$

где  $P = \text{const}$  – активная мощность на входе трансформатора, поддерживаемая постоянной посредством регулятора напряжения;  $W$  – заданная или измеренная энергия, необходимая для нагрева и расплавления заданного количества металла, помещенного в ванну;  $T$  – время процесса нагревания и расплавления.

Энергия, забираемая установкой от сети для выполнения процесса плавки, должна превышать энергию, необходимую для нагрева и расплавления металла, на величину тепловых потерь, рассеиваемых в окружающую среду через стенки ванны и передаваемых в погруженный магнитопровод индукторного трансформатора. Эти тепловые потери определяют тепловой КПД установки и учитываются в методике расчета (гл.3).

На практике, в зависимости от состояния шихты расплавленного металла (размер зерна, форма и состояние поверхности), происходит сложный пуск канальной печи или вообще он не работает. Для этого желательно использовать короткозамкнутый виток на магнитопроводе, который может быть выполнен из нержавеющей стали.

#### Модель N2 – индукторного трансформатора

Ввиду исключительной малости активного сопротивления вторичной обмотки – короткозамкнутого витка металла индуктивные сопротивления обмоток приобретают относительно ощутимую величину, и ими пренебрегать недопустимо.

Активное сопротивление первичной обмотки до расчета трансформатора точно определить невозможно, учитывая влияние условий: принятой плотности тока, условий охлаждения и величины первичного тока, которые точно определяются лишь после проектирования и испытаний.

Точный расчет индуктивных сопротивлений обмоток и рассеяния трансформатора представляет значительные трудности. Особенно это относится ко вторичной обмотке, которая представляет собой один короткозамкнутый виток.

С учетом вышеизложенного индуктивные сопротивления проектируемого индукторного трансформатора определяются методом перерасчета относительно существующего индукторного трансформатора близкой мощности и подобной конструкции, принятого в качестве базового, параметры которого конструктивно доведены до требуемого уровня, на основании замера токов, напряжений и мощностей базового трансформатора. Испытания проводятся при холостом ходе и нагрузке, результаты пересчитываются на основании векторных диаграмм.

Режим холостого хода имеет место при подключении базового трансформатора к сети при незагруженной в ванну шихте так, что не образуется короткозамкнутый виток вокруг магнитопровода трансформатора; режим нагрузки – при загруженной шихте.

Индуктивные сопротивления трансформатора определяются по вычисленным значениям индуктивных сопротивлений базового трансформатора посредством коэффициентов перерасчета по выражениям:

$$X_1 = X_{10} \cdot \frac{P_0}{P} \cdot \frac{U_1}{U_{10}}, \quad X_m = X_{m0} \cdot \frac{P_0}{P} \cdot \frac{U_1}{U_{10}}, \quad X_2 = X_{20} \cdot \frac{P_0}{P} \cdot \frac{U_1}{U_{10}}. \quad (17)$$

Динамическое активное сопротивление короткозамкнутого витка в процессе плавки от холодного состояния шихты до ее полного расплавления, как было определено выше, изменяется от  $R_1$  до  $R_2$ . Эти значения сопротивления экстремальны: обычно  $R_1$  – минимально,  $R_2$  – максимально. Они определяются по (4). Расчет ведется для двух значений сопротивления короткозамкнутого витка –  $R_1$  до  $R_2$  с определением напряжений и токов в обмотках индукторного трансформатора (каждое из них является максимальным или минимальным) по вышеприведенным формулам математической модели (4) - (12). На основании этих данных определяются пределы изменения напряжения, глубина регулирования (в режиме  $P=const$ ), токи первичной обмотки, параметры, мощность, потери индукторного трансформатора.

Математическая модель тепловых процессов описывает тепловыделения в элементах и перетоки тепла между элементами системы: первичной обмотки индуктора, вторичной обмотки индуктора в виде короткозамкнутого витка металла, помещенного в плавильную ванну, магнитопровода индуктора, а также электрической сети в качестве источника энергии и окружающего пространства, куда переходит энергия тепловых потерь.

Тепловая схема НЧКУ приведена на рис. 7.

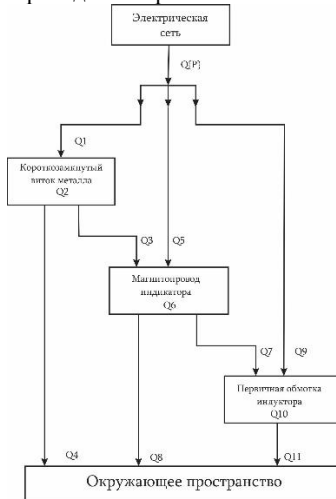


Рис. 7. Тепловая схема НЧКУ

Баланс указанных составляющих тепловых потоков (мощностей) выражается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} Q &= Q_1 + Q_5 + Q_9, & Q_3 + Q_5 &= Q_6 + Q_7 + Q_8, \\ Q_1 &= Q_2 + Q_3 + Q_4, & Q_7 + Q_9 &= Q_{10} + Q_{11}. \end{aligned} \quad (18)$$

Забираемая от сети электрическая мощность  $P$  эквивалентна тепловому потоку  $Q$ , который представляет собой сумму тепловых потоков (мощностей), выделившихся в элементах схемы.

В короткозамкнутом витке металла выделяется тепловая мощность  $Q_1$ :

$$Q_1 = \frac{U^2}{R(t)}, \quad (19)$$

где  $U$  – напряжение в контуре короткозамкнутого витка.

В магнитопроводе индукторного трансформатора выделяется тепловая мощность  $Q_5$  потерь в стали:

$$Q_5 = \Delta P_c G B^2 = \Delta P_c G \left( \frac{U_0}{4,44 w f S_m} \right)^2, \quad (20)$$

где  $\Delta P_c$  – удельные потери в стали магнитопровода;  $B$  – индукция в магнитопроводе;  $U_0$  – напряжение в контуре намагничивания;  $w$  – количество витков первичной обмотки индуктора;  $f$  – частота электрического тока;  $S_m$  – сечение магнитопровода.

В первичной обмотке индукторного трансформатора выделяется мощность  $Q_9$  потерь в меди обмотки:

$$Q_9 = I_1^2 R_1(t) = \frac{U_1^2}{R_1^2(t)}, \quad (21)$$

где  $U_1$  – напряжение, приложенное к первичной обмотке.

Переголки тепловой мощности между элементами происходят посредством теплопередачи через стенки, разделяющие среды с различной температурой.

Теплопередача через однослойную плоскую стенку имеет место при передаче: мощности  $Q_3$  от массы металла магнитопроводу; мощности  $Q_8$  от магнитопровода окружающей среде и мощности  $Q_{11}$  от первичной обмотки окружающей среде. Теплопередача через двухслойную плоскую стенку имеет место при передаче мощности  $Q_7$  от магнитопровода первичной обмотке и мощности  $Q_4$  от массы металла окружающей среде.

При воздействии тепловой энергии, выделившейся в элементе или переданной ему, в магнитопроводе  $Q_4$  и в обмотке индуктора  $Q_6$  повышается температура; в короткозамкнутом витке металла  $Q_2$  процесс проходит в два этапа.

На этапе 1 при поглощении тепловой энергии  $W_1$  происходит повышение температуры металла от начальной температуры  $t_0$  до температуры плавления  $t_n$ , при этом металл находится в твердом состоянии:

$$W_1 = C_1 G (t_n - t_0), \quad (22)$$

где  $C_1$  – удельная теплоемкость металла.

Продолжительность этапа 1 по времени:

1) при постоянной величине тепловой мощности на протяжении всего этапа 1:

$$T_1 = W_1 / Q_1, \quad (23)$$

где  $Q_1$  – тепловая мощность (тепловой поток), действующая на этапе 1;

2) при переменной величине тепловой мощности на протяжении этапа:

$$T_1 = \sum_{i=1}^{i_1} T_{1i} = \sum_{i=1}^{i_1} \frac{W_{1i}}{Q_{1i}}, \quad (24)$$

где  $W_{1i}, Q_{1i}$  – соответственно количество тепловой энергии и тепловой мощности, воздействующее на металл на единичном отрезке времени продолжительностью  $T_{1i}$  на этапе 1;  $i_1$  – количество единичных отрезков времени на этапе 1.

На этапе 2 при поглощении тепловой энергии  $W_2$  происходит постепенное плавление массы металла. При этом температура плавящегося металла остается неизменной и равна температуре плавления  $t_n$ . В промежутке времени от  $T_1$  до  $T_2$  вся масса металла расплавляется:

$$W_2 = C_2 G, \quad (25)$$

где  $C_2$  – удельная теплота плавления металла.

Продолжительность этапа 2 по времени:

1) при постоянной величине тепловой мощности на протяжении всего этапа 1:

$$T_2 - T_1 = W_2 / Q_2, \quad (26)$$

где  $Q_2$  – тепловая мощность (тепловой поток), действующая на этапе 2;

2) при переменной величине тепловой мощности на протяжении этапа 2:

$$T_2 - T_1 = \sum_{i=1}^{i_2} T_{2i} = \sum_{i=1}^{i_2} \frac{W_{2i}}{Q_{2i}}, \quad (27)$$

где  $W_{2i}, Q_{2i}$  – соответственно количество тепловой энергии и тепловой мощности, воздействующей на металл на единичном отрезке времени продолжительностью  $T_{2i}$  на этапе 2;  $i_2$  – количество единичных отрезков времени на этапе 2.

Выражения (18) - (27) представляют собой модель тепловых процессов НЧКУ.

Следует отметить, что предлагаемый принцип работы канальной печи имеет свое развитие, и он также применим для нагрева проводящих жидкостей.

**В третьей главе** излагается методика расчета и приведены результаты исследования НЧКУ.

Математические модели электрических и тепловых процессов объединены в единую динамическую математическую модель теплоэлектрических процессов. На основе указанной математической модели разработан алгоритм и методика расчета.

Методика предусматривает последовательность следующих действий:

- выбор базовой конструкции плавильной ванны и магнитопровода индуктора;
- определение электрических и тепловых величин;
- определение необходимости и корректировка заданных параметров;
- достижение заданных параметров: продолжительности теплового процесса  $T_{\sigma}$ , производительности процесса  $M$ , КПД установки  $\eta$ .

Расчет выполняется по шагам  $\Delta t$ . Принимается, что на интервале расчета  $\Delta t$  значения параметров не изменяются. Рассчитанные конечные значения принимаются в качестве начальных для последующего интервала расчета.

Расчет может выполняться для режимов постоянной мощности, постоянного напряжения или иных технологических условий.

Изложенная методика и алгоритм расчета могут быть использованы в автоматическом или в диалоговых полуавтоматических режимах для аналитических расчетов и исследований, а также для разработки системы автоматического управления процессом плавки.

**В четвертой главе** приводятся результаты испытаний опытно-экспериментального образца НЧКУ для плавки металлов.

Испытания проводились на НЧКУ предложенной конструкции (рис. 3), геометрические размеры которой приближены к размерам “типовой” конструкции (рис. 5).

Расплавляемый металл – сплав олова (40 %) и свинца (60 %), масса сплава - 24 кг, температура плавления - 238 °С. Состояние шихты в исходном холодном состоянии – монолит.

Предварительно проведены сравнительные испытания в режиме N1 при постоянной мощности  $P=const$  и регулируемом напряжении, а также в режиме N2 при неизменном напряжении  $U=const$  и нерегулируемой мощности. Сравнительные характеристики нагрева и плавления приведены на графиках на рис. 8а.

Нагрев шихты до температуры плавления происходит по восходящим ветвям характеристик рис. 8. На горизонтальных участках характеристик, когда температура шихты остается неизменной, происходит расплавление металла. Когда весь металл расплавлен, температура жидкого металла вновь возрастает.

Как следует из сравнительных испытаний (рис. 8а), режим N2 нагрева и плавления при неизменном напряжении  $U=const$  и нерегулируемой мощности обеспечивает более высокую производительность и соответственно меньшую продолжительность нагрева и плавления. Кроме того, в этом случае не требуется регулирование напряжения на входе, что является важным преимуществом. В связи с изложенным режим N2 при неизменном напряжении  $U=const$  и нерегулируемой мощности принят в качестве основного.

Далее в принятом основном режиме  $U=const$  проведены нагрев и плавление металла при непосредственном включении первичной обмотки индуктора на нерегулируемое напряжение сети 220 В. Характеристики нагрева и плавления приведены на графиках на рис. 8б. Параметры процесса следующие:

- мощность на всем этапе нагрева и плавления -  $1,74 \dots 2,43 \text{ кВт}$ ;
- энергия, затраченная для нагрева и плавления всей массы металла -  $0,812 \text{ кВт.ч}$ ;
- ток в короткозамкнутом витке металла -  $1409 \dots 1968 \text{ А}$ ;
- продолжительность всего процесса -  $23 \text{ мин}$ ;
- производительность процесса -  $1,04 \text{ кг/мин} = 62,6 \text{ кг/час}$ ;
- удельный расход электроэнергии -  $0,0338 \text{ кВт.ч/кг}$ ;
- коэффициент мощности  $\cos\varphi$  -  $0,53 \dots 0,86$ .

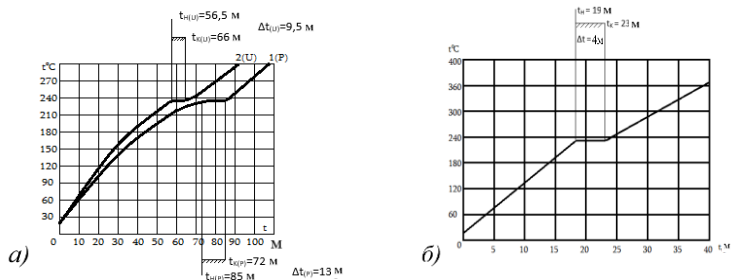


Рис. 8. Характеристики нагрева и плавления: а - в режимах N1 ( $P=\text{const}$ ) и N2 ( $U=\text{const}$ ); б - при непосредственном включении на нерегулируемое напряжение сети 220 В

КПД процесса нагрева и плавления определяется как отношение теоретически необходимой суммарной энергии нагрева сплава от температуры окружающей среды  $22 \text{ }^\circ\text{C}$  до температуры начала плавления  $238 \text{ }^\circ\text{C}$  и энергии расплавления сплава при температуре плавления  $238 \text{ }^\circ\text{C}$  к реально затраченной энергии на нагрев и расплавление металла, и составил  $66,4\%$ .

Полученная величина КПД реально может быть повышена за счет снижения потерь в первичной обмотке индуктора вследствие увеличения сечения проводника и размеров обмотки до заполнения окна магнитопровода до  $50\%$  площади окна. Это позволяет повысить КПД до  $70\%$  и более.

Достигнутые технико-экономические показатели разработанной НЧКУ предложенной конструкции превосходят показатели существующих индукционных установок близких параметров.

Разработка рекомендуется для инженерной практики.

### Основные выводы

1. К электрическим установкам для плавки металлов малой мощности предъявляются особо высокие требования по экономичности, надежности, экологичности и простоте конструкции. Однако для них отсутствуют обоснования по выбору вида установки, частоты электропитания и техническим решениям. Установки малой мощности выполняются по схмотехническим решениям, принятым для установок большой мощности, что усугубляет их недостаток.

2. Разработана и обоснована концепция создания установок для плавки металлов малой мощности, суть которой: установки канального вида, частота электропитания -  $50 \text{ Гц}$  непосредственно от промышленной сети, использование всего объема металла для выделения тепла; результат – максимальные производительность, надежность и КПД, простота конструкции.

3. Разработана конструкция НЧКУ с погруженным в металл магнитопроводом индуктора, которая обеспечивает высокие удельные технико-экономические показатели. Конструкция защищена патентом на изобретение.

4. Определены параметры “типовой” НЧКУ в зависимости от вида расплавляемого металла, обеспечивающие наилучшие техникоэкономические показатели.

5. Разработаны динамическая математическая модель тепло-электрических процессов и методика расчета предложенной НЧКУ.

6. Разработан и изготовлен опытно-экспериментальный образец предложенной НЧКУ. Результаты испытаний подтверждают превосходство технико-экономических показателей относительно существующих установок близких параметров, а также адекватность модели и методики реально протекающим процессам.

#### **Основные результаты диссертации** опубликованы в работах:

1. Արտոնագիր № 2533 А. Խողակավոր վառարան / **ժ.Դ. Դավիդյան, Պ.Ս. Մանուկյան, Ա.Մ. Հարությունյան**. - 27.06.2011:

2. Արտոնագիր № 2545 А. Հեղուկի ինդուկցիոն էլեկտրատաքացուցիչ / **ժ.Դ. Դավիդյան, Պ.Ս. Մանուկյան, Ա.Մ. Հարությունյան**. - 25.08.2011:

3. **Դավիդյան ժ.Դ., Մանուկյան Պ.Ս., Հարությունյան Ա.Մ.** Հեղուկների ինդուկցիոն էլեկտրատաքացուցիչ // ՀՊՃՀ Լրաբեր. Գիտական հոդվածների ժողովածու. - 2012. - Մաս 1. - էջ 421-425:

4. **Հարությունյան Ա.Մ.** Խողակավոր վառարան // ՀՃԱ Լրաբեր. Գիտատեխնիկական հոդվածների ժողովածու. - Երևան, 2012, Հ. 9, №1. - էջ 57-59:

5. **Հարությունյան Ա.Մ.** Մետաղների հալեցման ցածր հաճախային խողակային տեղակայանքի փորձարարական նմուշի փորձարկումը // ՀՃԱ Լրաբեր. Գիտատեխնիկական հոդվածների ժողովածու. - Երևան, 2017, Հ. 14, №4. - էջ 557-561:

6. **Давидян Ж.Д., Манукян П.С., Арутюнян А.М.** Расчет новой экономической печи для электрической плавки металлов // Вестник ГИУА, серия электротехника, энергетика. – Ереван, 2012, вып. 15, №2. – С. 42-50.

7. **Манукян П.С., Арутюнян А.М.** Математическая модель электрических процессов НЧКУ // ՀԱՊՀ Լրաբեր. Գիտական հոդվածների ժողովածու. - Երևան, 2017. - Մաս 2. - էջ 718-725:

8. **Манукян П.С., Мартиросян Г.А., Арутюнян А.М.** Горизонтальная эксцентричная канальная печь // Вестник ИАА: Сборник научно-технических статей. – Ереван, 2011. - Том 8, № 2. – С. 293-298.

9. **Манукян П.С., Хостикиан Г.Н., Саргсян С.Дж., Арутюнян А.М.** Оптимизация параметров тиристорных инверторов на повышенных частотах // ՀՊՃՀ Լրաբեր. - Եր.: Ճարտարագետ, 2009. - Հ. 1, №1. - էջ 252-263:

10. **Петросян Н.Н., Манукян П.С., Арутюнян А.М.** Высокоэффективные источники питания для плавки и обработки металлов // Практическая силовая электроника. - М., 2011. - № 41. - С. 29-37.

## Աննա Մարտինի Հարությունյան

### Մետաղների հալեցման կատարելագործված ինդուկցիոն էլեկտրատեղակայանքի մշակումը

#### ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Մետաղների տաքացման և հալեցման կրակնային եղանակների համեմատ էլեկտրական եղանակներն էական առավելություն ունեն՝ ըստ տնտեսական, տեխնոլոգիական և բնապահպանական բնութագրերի: Առավել տարածում են ստացել տեղակայանքների սկզբունքորեն տարբերվող տեսակները՝ ինդուկցիոն տաքացման բարձրահաճախական տիգելային և օհմական տաքացման ցածրահաճախական (50 Հց) խողակային:

Ինդուկցիոն տաքացման բարձրահաճախական տիգելային տեղակայանքներն ունեն բարձր արտադրողականություն, սակայն ունեն նաև զգալի թերություններ. բարձր հաճախության օգտագործումը (մինչև տասնյակ ԿՀց, ի դեպ հզորության ցածրացումով հաճախությունը մեծանում է մինչև հարյուրավոր ԿՀց) և դրա հետ կապված տեխնոլոգիական և բնապահպանական խնդիրները, ինչպես նաև ցածր տնտեսավետությունը:

Օհմական տաքացման ցածրահաճախական խողակային տեղակայանքներն օգտագործում են արդյունաբերական ցանցի ցածր հաճախությունը, և դրա հետ կապված ապահովում են տեխնոլոգիական և բնապահպանական առավելություն, առավել բարձր ՕԳԳ, բայց ունեն ցածր արտադրողականություն և կառուցվածքի տեխնոլոգիական խնդիրներ:

Մետաղների հալեցման ցածր հզորության տեղակայանքներին՝ մի քանի ԿՎտ կարգի, ներկայացվում են հատուկ բարձր պահանջներ՝ ըստ տնտեսավետության հուսալիության, բնապահպանության և կառուցվածքի պարզության: Սակայն ներկայումս ցածր հզորության տեղակայանքների համար բացակայում են տեղակայանքի՝ տեսակի, էլեկտրասնման հաճախության, կառուցվածքային և սխեմատեխնիկական լուծումների ընտրության հիմնավորումները: Ցածր հզորության տեղակայանքները կատարվում են բարձր հզորության տեղակայանքների համար ընդունված սխեմատեխնիկական լուծումներով, ինչը խորացնում է դրանց թերությունները: Հետևաբար, արդիական են նաև դրանց կառուցվածքային և սխեմատեխնիկական լուծումների հարցերը, հաշվարկման և հետազոտման մեթոդների մշակումն ու հիմնավորումը:

Սույն հետազոտության հիմնական նպատակն է՝

1. Մշակել մետաղների հալեցման տեխնոլոգիական բարձր արդյունավետությամբ ցածր հզորության էլեկտրական տեղակայանքների ստեղծման կոնցեպցիան (հայեցակարգը):

2. Մշակել և հետազոտել բարձր տեխնիկատնտեսական և շահագործման ցուցանիշներով կատարելագործված ցածր հզորության խուղակային տեղակայանք:

3. Մշակել և հետազոտել հետազոտության ու հաշվարկման համապատասխան մեթոդներ:

Հետազոտության գիտական նորույթ պարունակող առավել կարևոր արդյունքներին կարելի է դասել հետևյալները.

1. Մշակված է մետաղների հալեցման ցածր հզորության տեղակայանքի ստեղծման կոնցեպցիան, որի էությունն է՝ խուղակային տեսակի տեղակայանքներ, անմիջականորեն արդյունաբերական ցանցից էլեկտրասնում, ջերմության անջատման համար մետաղի ողջ ծավալի օգտագործում, արդյունքը՝ առավելագույն արտադրողականություն, հուսալիություն և բարձր ՕԳԳ:

2. Մշակված են խուղակային վառարանի կառուցվածքը (պաշտպանված է գյուտի արտոնագրով)՝ մետաղում ինդուկտորային տրանսֆորմատորի մագնիսալարի տեղադրմամբ, տաշտի չափսերը և հաշվարկի մեթոդիկան:

3. Առաջարկված է խուղակային տեղակայանքի ջերմաէլեկտրական գործընթացների դինամիկ մաթեմատիկական մոդել, որը հնարավորություն է տալիս ապահովել ընթացող գործընթացին համապատասխան հաշվարկը և ավտոմատ կառավարման համակարգի մշակումը:

4. Մշակված է առաջարկված խուղակային տեղակայանքի ջերմաէլեկտրական գործընթացների հաշվարկման մեթոդ համակարգչային Matlab ծրագրային փաթեթի կիրառմամբ:

Աշխատանքում որոշված են տիպային խուղակային վառարանի պարամետրերը՝ կախված հալվող մետաղի տեսակից, որն ապահովում է լավագույն տեխնիկատնտեսական ցուցանիշներ: Ինչպես նաև մշակված և պատրաստված է առաջարկված ցածրահաճախական խուղակային տեղակայանքի փորձարարական նմուշ: Փորձի արդյունքները հաստատում են, որ առաջարկված կառուցվածքի մշակված խուղակային տեղակայանքի ձեռք բերված տեխնիկատնտեսական ցուցանիշները գերազանցում են մոտ պարամետրերով հայտնի ինդուկցիոն տեղակայանքների ցուցանիշներին: Մշակված մաթեմատիկական մոդելները, հետազոտման ու հաշվարկման մեթոդները երաշխավորվում են գործնականում օգտագործման համար:

Աշխատանքի արդյունքները հավաստում են մետաղների հալման ցածր հզորության էլեկտրաինդուկցիոն տեղակայանքների կատարման հնարավորությունն ու նպատակահարմարությունը ցածրահաճախական (50Հց) խուղակային տեղակայանքի սկզբունքով անմիջական արդյունաբերական ցանցից սնման դեպքում:

Մշակումը երաշխավորվում է ինժեներական պրակտիկայի համար:

Ատենախոսության արդյունքները կիրառվել են «Ա/Ձ Է. Մանուկյան», «Մարգարյան եղբայրներ» ՍՊԸ և «Նիկոլ Դուման» ՍՊԸ կազմակերպություններում մետաղների հալեցման ինդուկցիոն տեղակայանքների մշակման աշխատանքներում:

**The development of improved metal melting induction electrical installation**

**ANNOTATION**

Compared with fire methods of metal heating and melting electrical methods has significant advantages by their economical, technological and environmental properties. The most applicability got following kinds of fundamentally different installations: high-frequency crucible installations of induction heating and low-frequency (50Hz) channel installations of ohmic heating.

High-frequency crucible installations of induction heating have high performance, but also has significant disadvantages: usage of high frequency (up to tens of kHz, by the way with decreasing of power, frequency goes up to hundreds of kHz) and connected with that technological and environmental issues, also low economy.

Low-frequency channel installations of ohmic heating use low frequency of industrial network and together with that provide technological and environmental advantage, higher efficiency, but has low performance and technological issues of construction.

For low-power installations of metal melting - a few kilowatts, particularly high requirements are on economy, reliability, environmental friendliness and simplicity of design. However, at present there are no justifications for selection of kind, source frequency, constructional and schematically solutions of low-power installations. Low-power installations designed by schematically solutions made for high-power installations, which severs their disadvantages. Consequently, the issues of constructional and schematically solutions, development and justification of methods of calculation and investigation are actual.

The aim of this investigation is:

1. Develop the conception of creature of low-power electrical installations of metal melting with high technological performance.
2. Develop and investigate improved low-power channel installation with high technical, economical and operational indicators.
3. Develop and investigate relevant methods of investigation and calculation.

The following can be considered as the most important results of investigation, containing scientific novelty:

1. The concept of creating low-power installations for metal melting has been developed, the essence of which is: channel type installations, frequency of power supply 50 Hz directly from the industrial network, use of the entire volume of metal for heat generation; the result - maximum performance, reliability and efficiency.
2. The design with installed induction transformer core in metal, dimensions and calculation methodology of channel furnace has been developed.
3. The dynamic mathematical model of thermal electrical processes of channel installation has been proposed, which allows to ensure corresponding calculation and development of automatic control system.
4. The calculation method (with the usage of Matlab software) of thermal electrical processes of proposed channel installation has been developed.

Typical channel furnace parameters (depended from the type of melted metal) which ensure best technical economical indicators has been defined in this paper. Also the test sample of proposed low-frequency channel furnace has been developed and produced. The test results confirm that the technical and economic indicators of the developed channel installation with the proposed design surpass the same indicators of known induction installations with similar parameters. Developed mathematical models, investigation and calculation methodologies guaranteed for practical use.

The results of this paper proof the possibility and advisability of implementation of low-power electrical inductive installations for metal melting in case of direct supply from industrial network with principle of low-frequency (50Hz) channel furnace.

The development is guaranteed for engineering practice.

The results of this Dissertation has been implemented in IE “E. Manukyan”, “Margaryan Eghbayrner” Ltd., “Nickol Duman” Ltd., in development of metal meting induction installations.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Apris', is located on the right side of the page. The signature is written in a cursive style and is enclosed within a faint, light-colored rectangular border.