

Министерство образования Республики Беларусь

**Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»**

Кафедра «Металлургия и литейное производство»

В. А. Жаранов

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ

ПРАКТИКУМ

**по одноименному курсу для студентов
специальности 1-42 01 01 «Металлургическое
производство и материалобработка (по направлениям)»
специализации 1-42 01 01-01 «Металлургическое
производство и материалобработка (металлургия)
направления 1-42 01 01-01 02 «Электрометаллургия
черных и цветных металлов»
дневной и заочной форм обучения**

Гомель 2014

УДК 621.365(075.8)
ББК 34.314я73
Ж34

*Рекомендовано научно-методическим советом
механико-технологического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 1 от 22.01.2013 г.)*

Рецензент: канд. физ.-мат. наук, доц. каф. «Техническая механика»
ГГТУ им. П. О. Сухого *Д. Г. Кроль*

Жаранов, В. А.

Ж34 Расчет и проектирование электропечей : практикум по одному курсу для студентов специальности 1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалобработка (по направлениям)» специализации 1-42 01 01-01 «Металлургическое производство и материалобработка (металлургия) направления 1-42 01 01-01 02 «Электрометаллургия черных и цветных металлов» днев. и заоч. форм обучения / В. А. Жаранов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2014. – 120 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://library.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Содержит сведения о методах и алгоритмах расчета электропечей, а также работы с индивидуальными заданиями для выполнения расчета.

Для студентов специальности 1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалобработка (по направлениям)» дневной и заочной форм обучения.

**УДК 621.365(075.8)
ББК 34.314я73**

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2014

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 ОБЩАЯ ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	6
1.1 Определение размеров рабочего пространства и футеровки печи.....	6
1.2 Энергетический баланс и выбор мощности трансформатора.....	19
1.2.1 Определение полезной энергии для нагрева и расплавления металла и шлака.....	20
1.2.2 Определение тепловых потерь через футеровку	23
1.2.3 Определение тепловых потерь излучением через рабочее окно	27
1.2.4 Определение тепловых потерь с выходящими из печи газами	27
1.2.5 Определение тепловых потерь в период межплавочного простоя....	28
1.2.6 Определение тепла экзотермических реакций в период расплавления.....	29
1.2.7 Энергетический баланс периода плавления	29
1.2.8 Определение мощности печного трансформатора	30
1.3 Выбор типа и определение размеров электрода	32
1.4 Расчет электрических параметров печи.....	35
1.4.1 Определение активных сопротивлений.....	36
1.4.2 Определение индуктивных сопротивлений	38
1.4.3 Определение электрического режима.....	39
2 ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ	42
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №1 – ИЗУЧЕНИЕ ОБЛУЧЕННОСТИ ФУТЕРОВКИ НА УРОВНЕ ДУГ.....	42
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №2 – ИЗУЧЕНИЕ ОБЛУЧЕННОСТИ ФУТЕРОВКИ СТЕНЫ РАЗЛИЧНОГО ПРОФИЛЯ ПО ВЫСОТЕ.....	50
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №3 – РАСЧЕТ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИ РАЦИОНАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА ДУГОВОЙ ПЕЧИ ЗАДАННОЙ ВМЕСТИМОСТИ	59
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №4 – РАЗРАБОТКА И ИЗУЧЕНИЕ ГРАФИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕЖИМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПЕРИОДА ПЛАВКИ В ДУГОВОЙ ПЕЧИ	75

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №5 – РАЗРАБОТКА И ИЗУЧЕНИЕ ГРАФИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕЖИМА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПЕРИОДА ПЛАВКИ В ДУГОВОЙ ПЕЧИ	90
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №6 – ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ (ЭПС)	102
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №7 – РАСЧЕТ И ВЫБОР НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕЧИ СОПРОТИВЛЕНИЯ.....	111
ЛИТЕРАТУРА	115

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее распространённым плавильным агрегатом электрометаллургии является дуговая сталеплавильная печь (ДСП).

Дуговые сталеплавильные печи имеют широкое применение в электросталеплавильном производстве на заводах черной металлургии, а также в фасонно-литейных цехах различных отраслей машиностроения.

Дуговые печи могут иметь основную (магнезит, хромомagneзит, магнезитохромит и др.) или кислую (динас, кварцит) футеровку. Печи с кислой футеровкой имеют ограниченные возможности для проведения технологических процессов по удалению таких вредных примесей как фосфор и сера. Поэтому они применяются преимущественно в фасонно-литейных цехах для переплава чистого по сере и фосфору скрапа с целью получения углеродистой или низколегированной стали. Емкость таких печей не более 10 – 15 т.

Металлургическая электросталь обычно выплавляется в ДСП с основной футеровкой. Наиболее характерным способом работы печи с основной футеровкой является плавка с окислением, в процессе которой производятся обезуглероживание и дефосфорация, затем раскисление и обессеривание, а при необходимости – легирование стали. В современных электросталеплавильных цехах широко распространяется выплавка стали одношлаковым процессом с проведением ряда операций вне печи. Эти печи работают в электросталеплавильных цехах, где металл разливается в изложницы для получения слитков или заготовок на установках непрерывной разливки стали. Дуговые печи с основной футеровкой также получают значительное распространение в литейных цехах для получения качественного фасонного литья.

Развитие сталеплавильных печей связано с ростом производства высококачественных и специальных сталей. Преимущества ДСП сводятся к следующему:

- 1) возможность получения высоких температур и введения больших удельных мощностей в печь, что обеспечивает высокую производительность;
- 2) наличие в печи восстановительной атмосферы в восстановительный период плавки;
- 3) наличие в печи жидкоподвижных шлаков в сочетании с восстановительной атмосферой, позволяющее осуществлять десульфурацию и раскисление металла более полно;

4) электродинамическое движение металла под электрическими дугами, создающее благоприятные условия для прогрева ванны по глубине за счёт конвекции;

5) благоприятные условия для восстановления оксидов легирующих элементов и меньший их угар;

6) возможность легко и плавно регулировать подводимую в печь мощность.

Современное развитие металлургии характеризуется значительным приростом производства стали. Опережающий рост при этом получает кислородно-конвертерный способ и производство стали в дуговых сталеплавильных печах. Если ранее в ДСП в основном выплавляли качественные легированные стали, то в настоящее время наряду с легированной сталью выплавка рядовых марок углеродистой стали носит массовый характер.

В современной практике существуют следующие основные тенденции развития ДСП и технологических процессов производства электростали:

1) укрупнение единичной емкости агрегатов;

2) повышение удельных мощностей и вторичных токов и напряжений;

3) механизация трудоемких процессов;

4) совершенствование автоматического управления электрическим режимом;

5) использование вычислительной техники в управлении энергетическим режимом и технологическим процессом плавки;

6) повышение надежности, долговечности и ремонтоспособности агрегата в целом и отдельных элементов его конструкции. Создание прогрессивных конструкций токоподводов;

7) интенсификация расплавления шихты и протекающих в печи технологических процессов за счет подогрева шихты, совмещения отдельных периодов плавки, применения газообразного кислорода, продувки металла порошкообразными реагентами и использования комплексных раскислителей;

8) использование в шихте продуктов прямого восстановления – металлизированных окатышей;

9) вынесение части технологических операций из печи в ковш с целью сокращения окислительного и восстановительного периодов плавки (вакуумирование в ковше, обработка синтетическими шлаками, продувка агрономом и т.п.).

Особое место в направлении развития ДСП занимает вопрос о соотношении между емкостью и мощностью печи, так как единичная емкость и электрическая мощность агрегатов увеличиваются. Решение проблемы может быть достигнуто путем технико-экономического анализа показателей работы ДСП. Использование экономически обоснованной электрической мощности необходимо подтвердить технически по условиям электрических параметров печи и трансформатора, службы футеровки, электродов и т.д.

При проектировании технически совершенной дуговой печи необходимо выполнение условий:

Оптимальное соотношение между размерами печи и мощностью преобразования.

Выбор рациональных геометрических пропорций рабочего пространства печи и расположения источников теплогенерации, обеспечивающих наилучшее протекание технологических и теплообменных процессов, и также достаточно высокий тепловой к.п.д.

Обеспечение температурного и теплового режимов в зоне технологического процесса, энергетического режима в рабочем пространстве печи и электрического режима ДСП в соответствии с требованиями технологического процесса и рационального теплообмена в печи по ходу плавки.

Рациональные электрические параметры ДСП (активное и реактивное сопротивление, сила тока и напряжение), обеспечивающие высокие электрический к.п.д. и коэффициент мощности.

Комплексная механизация технологического процесса и обслуживания печи, автоматизация управления ДСП в виде АСУ, обеспечивающие эксплуатацию печи с высокими технико-экономическими показателями (максимальная производительность при наименьших материальных и энергетических затратах).

1 ОБЩАЯ ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1 Определение размеров рабочего пространства и футеровки печи

Внутренние размеры ванны и плавильного пространства рассчитываются исходя из номинальной емкости печи.

Основными геометрическими параметрами ДСП являются: диаметр ванны по зеркалу жидкого металла, глубина ванны металла, внутренний диаметр кожуха печи, высота плавильного пространства.

При определении геометрических размеров печи необходимо задаться формой ванны. Наиболее распространенной для круглой трехфазной ДСП является сфероконическая ванна с углом между образующей и осью конуса, равным 45° (рисунок 1.1).

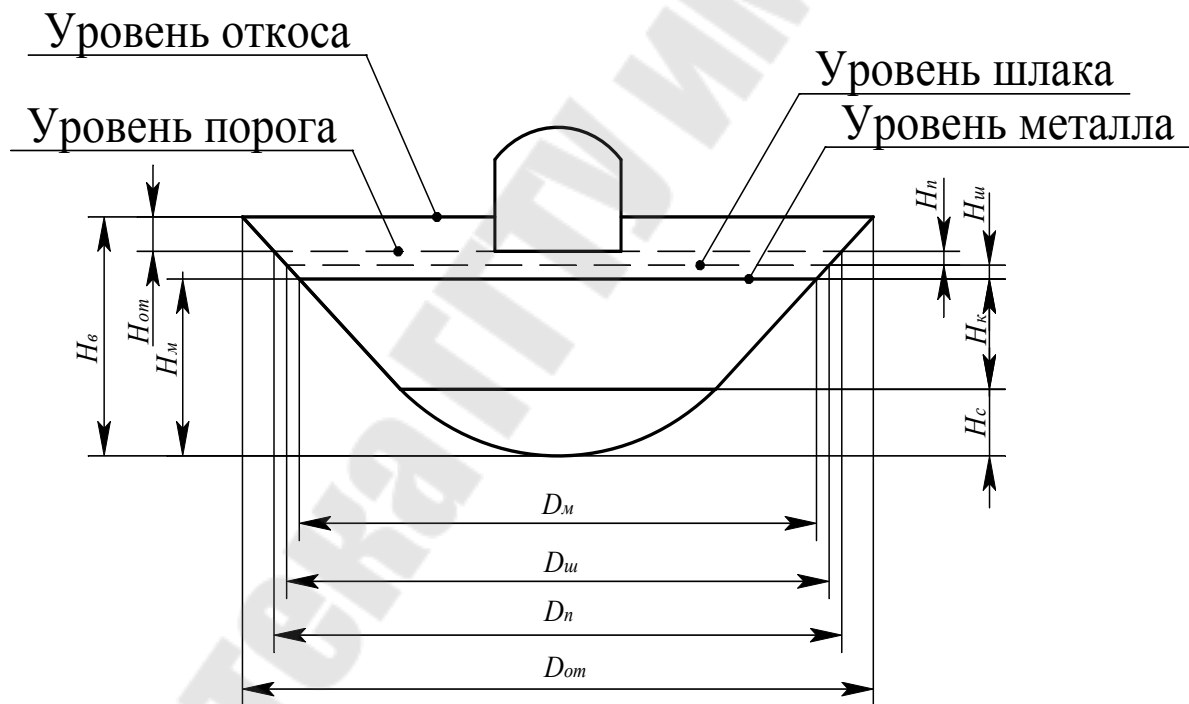


Рисунок 1.1 – Сфероконическая ванна ДСП

При определении геометрии ванны главный вопрос заключается в выборе рационального значения диаметра ванны по зеркалу жидкого металла к глубине ванны жидкого металла (D_m/H_m). Увеличение этого отношения ведет к уменьшению глубины металла (H_m) и возрастанию диаметра зеркала металла (D_m), что способствует более качественному проведению металлургических процессов, протекающих на границе

металл – шлак. Более высокое увеличение отношения D_m/H_m ведет к увеличению габаритов кожуха и конструкции всей печи, что снижает ее технико-экономические показатели. Уменьшение значения отношения D_m/H_m означает углубление жидкой ванны.

Для большинства основных электродуговых печей это отношение составляет [2]

$$D_m/H_m = 4,5 \div 5,5 \quad (1.1)$$

причем нижний предел относится к печам меньшей емкости, выпускающим металл сравнительно простого сортамента, когда не требуется проведения глубоких процессов рафинирования. Для печей средней и большой емкости, где осуществляется сложная технология раскисления металла с применением диффузионных процессов на границе металл - шлак, следует придерживаться верхнего предела. В большегрузных печах, предназначенных в основном для выплавки рядовых углеродистых сталей с короткой рафинировкой, это отношение составляет

$$D_m/H_m = 5,0 \quad (1.2)$$

Для печей небольшой емкости с кислой футеровкой

$$D_m/H_m = 3,5 \div 4,5 \quad (1.3)$$

Полная глубина металлической ванны состоит из двух частей (рисунок 1.1)

$$H_m = H_k + H_c, \quad (1.4)$$

где H_k – глубина металла конической части ванны, мм;

H_c – глубина металла сферической части ванны, мм.

Для сфероконической ванны, где $H_k = 0,8H_m$ и $H_c = 0,2H_m$ [3], диаметр зеркала металла можно определить по следующей формуле [4]

$$D_m = 2000C\sqrt[3]{V_m}, \quad (1.5)$$

где V_m – объем жидкого металла, м³;

C – коэффициент.

Если высота сферического сегмента принимается равной 20% глубины жидкого металла ($H_c = 0,2H_m$), то для этого случая коэффициент C определяется по формуле [2, 3, 5]

$$C = 0,875 + 0,042a, \quad (1.6)$$

где a – коэффициент, равный отношению D_m/H_m .

Если $H_c = 0,25H_m$, то коэффициент C определяется по формуле [6]

$$C = 0,09 + 0,04a \quad (1.7)$$

При заданной глубине и известном объёме жидкого металла диаметр зеркала металла (D_m , мм) можно определить по формуле [4]

$$D_m = \frac{1750}{1/\sqrt[3]{V_m} - 84/H_m} \quad (1.8)$$

Объём жидкого металла (V_m) определяется из удельного объёма жидкого металла (v_m) и заданной ёмкости печи (G) [3, 6]

$$V_m = v_m G \quad (1.9)$$

При расчёте объёма ванны, занимаемого жидким металлом и шлаком, принимают следующие значения плотности ρ [3]:

для стали $7,0 \div 7,2$ т/м³ (обратная величина – удельный объём $v_m = 0,139 - 0,143$ м³/т);

для основного шлака $3,0 \div 3,2$ т/м³ ($0,313 - 0,333$ м³/т);

для кислого шлака $2,9$ т/м³ ($0,345$ м³/т).

Тогда объём жидкого металла (V_m , м³) определяется

$$V_m = v_m G \quad \text{или} \quad V_m = G/\rho_m, \quad (1.10)$$

где G – заданная ёмкость печи, т;
 v_m – удельный объём стали, м³/т;
 ρ_m – плотность стали, т/м³.

Объём шлака составляет 20% объёма металла в небольших печах и 15÷17 % - в крупных, поэтому объём шлака ($V_{ш}$, м³) определяется по формуле [3]

$$V_{ш} = (0,15 \div 0,20)V_m \quad (1.11)$$

Высота слоя шлака ($H_{ш}$, мм) определяется по формуле [2]

$$H_{ш} = \frac{1000 \cdot V_{ш}}{\pi \cdot D_m^2 / 4} \quad (1.12)$$

Учитывая, что объём ванны печи состоит из объёма усечённого конуса и объёма шарового сегмента, объём жидкого металла можно вычислить [7]

$$V_m = \frac{\pi \cdot H_k}{3} (R_m^2 + R_m \cdot R_c + R_c^2) + \pi \cdot H_c \left(\frac{R_c^2}{2} + \frac{H_c^2}{6} \right) \quad (1.13)$$

Если в это выражение подставить значения

$$D_m = a \cdot H_m; \quad D_c = D_m - 2 \cdot H_k; \quad H_c = H_m / 5; \quad H_k = 4 \cdot H_m / 5$$

то объём жидкого металла можно выразить через D_m или через H_m . Как видно из рисунка 1.1 диаметр зеркала шлака можно определить

$$D_{ш} = D_m + 2 \cdot H_{ш} \quad (1.14)$$

Уровень порога рабочего окна принимается на уровне зеркала шлака или на 20÷40 мм выше [3], тогда диаметр на уровне порога завалочного окна

$$D_n = D_{ш} + 2 \cdot H_n, \quad (1.15)$$

где H_n – расстояние от зеркала шлака до уровня порога рабочего окна, мм.

Уровень откосов рекомендуется принимать для печей всех ёмкостей на 30÷70 мм выше уровня порога рабочего окна [3], тогда диаметр ванны на уровне откосов

$$D_{om} = D_n + 2 \cdot H_{om}, \quad (1.16)$$

где H_{om} – расстояние от уровня порога рабочего окна до уровня откосов, мм.

Полная глубина ванны включает следующие величины (рисунок 1.1)

$$H_g = H_m + H_{uu} + H_n + H_{om} \quad (1.17)$$

После определения основных размеров ванны приступают к определению размеров свободного пространства печи, основными размерами которого являются:

диаметр плавильного пространства на уровне откосов ($D_{n.n}$);

высота плавильного пространства ($H_{n.n}$ – высота от уровня откосов до внутренней поверхности свода);

высота стен от уровня откосов до пят свода (H_{cm}).

Диаметр плавильного пространства печи принимается равным диаметру ванны на уровне откосов [3]

$$D_{om} = D_{n.n} \quad (1.18)$$

Высота плавильного пространства печи состоит из двух величин

$$H_{n.n} = H_{cm} + H_{cnp}, \quad (1.19)$$

где H_{cm} – высота стены от уровня откосов до пят свода печи, мм;

H_{cnp} – стрела выпуклости свода, мм.

С учётом подвалки шихты, улучшения условий службы огнеупорной кладки стенки, снижения опасности поломок длинных электродов, сокращения габаритных размеров, массы металлоконструкций и стоимости печи Л.С. Канцевич [8] рекомендует следующие высоты стен:

1) Для печей ёмкостью 0,5 – 6 т

$$H_{cm} = (0,45 \div 0,50) \cdot D_{n.n} \quad (1.20)$$

2) Для печей ёмкостью 12 – 50 т

$$H_{cm} = (0,40 \div 0,45) \cdot D_{n.n} \quad (1.21)$$

3) Для печей ёмкостью 100 т и выше

$$H_{cm} = (0,34 \div 0,38) \cdot D_{n.n} \quad (1.22)$$

принимая большие значения коэффициента для малых ДСП, а меньшие значения – для крупных.

А.В. Егоров [9] из условий теплообмена и возможности размещения металлошихты большего в 5 - 7 раз объёма по сравнению с жидким металлом рекомендует

$$H_{cm} = (0,35 \div 0,45) \cdot D_{n.n} \quad (1.23)$$

Л.Е.Никольский и др. [2] с теплотехнической точки зрения высоту плавильного пространства и высоту стен печи рекомендуют выбирать в следующих пределах

$$H_{n.n} = (0,55 \div 0,70) \cdot D_{n.n} \quad (1.24)$$

1) H_{cm} для печей с основной футеровкой

$$H_{cm} = (0,40 \div 0,55) \cdot D_{n.n} \quad (1.25)$$

2) H_{cm} для печей с кислой футеровкой

$$H_{cm} = (0,45 \div 0,60) \cdot D_{n.n} \quad (1.26)$$

Величина стрелы выпуклости свода зависит от материала свода и составляет от пролёта свода 0,1 (10%) при использовании динасового кирпича и 0,12÷0,15 (12÷15%) при применении термостойкого хромомагнезитового кирпича [2].

Стрела подъёма свода из магнезитохромитового кирпича обычно принимается равной 15% диаметра свода. В случае кладки свода из

динасового кирпича стрела подъёма может быть принята 10% диаметра свода [6].

С учётом коэффициента теплового расширения огнеупорного материала стрелу выпуклости свода на практике принимают [3]:

1) для основных огнеупоров

$$H_{стр} = (0,11 \div 0,15) \cdot D_{св} \quad (1.27)$$

2) для кислых огнеупоров

$$H_{стр} = (0,08 \div 0,10) \cdot D_{св} \quad (1.28)$$

Для предварительных расчётов $D_{св}$ рекомендуется принимать равным диаметру кожуха на уровне пят свода $D_{к.св}$ [3] или $D_{св} > D_{к.св}$ [2].

После выбора внутренних размеров печного пространства следует определить его внешние размеры, для чего необходимо принять конструктивные решения футеровки печи с выбором профиля кладки боковых стен, огнеупорных и теплоизоляционных материалов для подины стен и свода печи. В настоящее время с целью повышения стойкости свода печи, его выкладывают только из рабочего слоя, т.е. без теплоизоляционного слоя. На основании опыта эксплуатации ДСП заводов качественной металлургии и учитывая размеры стандартных огнеупорных кирпичей И.Ю. Зинуров и др. [2] рекомендуют следующие толщины сводов (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Толщина сводов ДСП (по И.Ю. Зинурову)

G, m	4÷8	9÷20	21÷35	36÷55	56÷75	76÷100
$\delta_{св}, мм$	300	300	380	380	460	460

Егоров А.В. [9] рекомендует следующие толщины сводов печей при использовании периклазохромитовых, высокоглиноземистых или динасовых кирпичей (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Толщина сводов ДСП (по А.В. Егорову)

G, m	6	12	25	50	100
$\delta_{св}, мм$	230	230	300	300	380

Профиль футеровки стены (рисунок 1.2) определяет тепловую работу ДСП и такие технико-экономические показатели, как стойкость

футеровки, удельный расход электрической энергии, расходы по переделу. Для ДСП применяют стены различной конструкции:

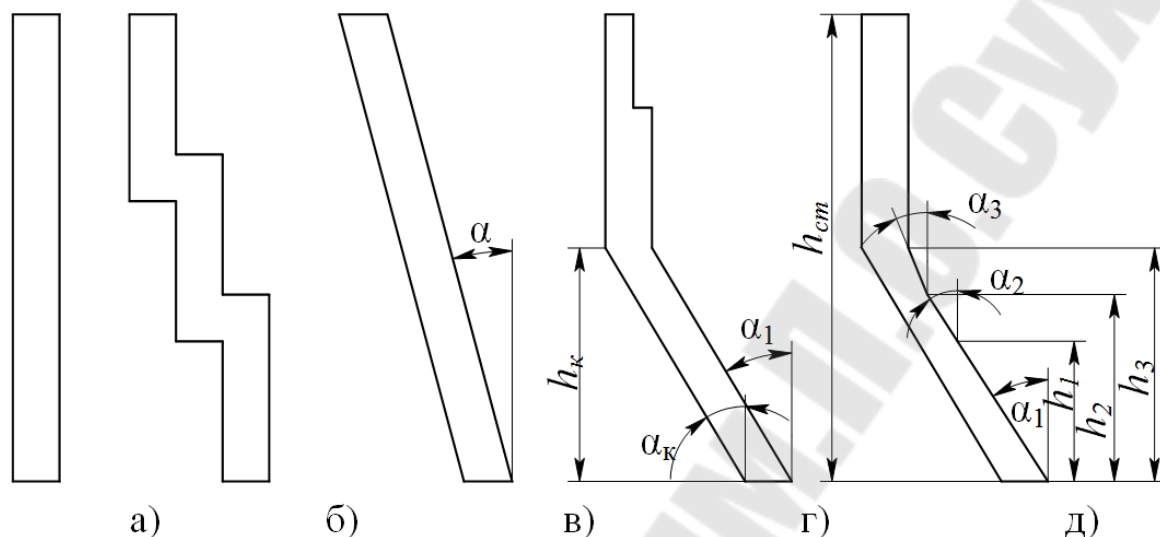


Рисунок 1.2 – Схема профиля кладки стен ДСП

цилиндрические – для маломощных ДСП первого и второго поколений и для современных высокомоощных ДСП четвёртого поколения с водоохлаждаемыми панелями (рисунок 1.2, а);

ступенчатые – на реконструированных ДСП второго поколения (при соответствующей ступенчатой конструкции кожуха (рисунок 1.2, б);

конические – на ДСП фасонно-литейных цехов машиностроительных заводов, работающих с набивной футеровкой стен (рисунок 1.2, в);

сложного профиля – для ДСП третьего поколения, имеющих повышенную электрическую мощность (рисунок 1.2, г, д).

В последние годы цилиндроконические кожухи нашли применение для выполнения кладки боковых стен с внутренним наклонным профилем (рисунок 1.2, г). Рациональный профиль кладки с различными углами наклона стен по высоте, разработанный в результате теоретических и экспериментальных исследований Л.Е. Никольским и Н.В. Огороковым, представлен на рисунке 1.2, д. Увеличение стойкости футеровки стен обеспечивается в основном

тогда, когда угол $\alpha_1=25\div 30^\circ$. Для обеспечения такого угла И.Ю. Зинуров рекомендует иметь углы наклона конической вставки [2] приведенные в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Углы наклона конической вставки футеровки стен ДСП

$G, т$	5 – 30	36 – 70	71 – 20
$\alpha_k, град$	12 – 17	18 – 22	23 – 30

Коническая часть кожуха начинается от верхнего уровня откосов и составляет по высоте

$$h = (0,25 \div 0,50) \cdot H_{cm} \quad (1.29)$$

Стремление увеличить стойкость футеровки стен привело к использованию водоохлаждаемых элементов в ДСП с цилиндрическим и другими кожухами.

Кладки стен дуговых сталеплавильных печей ранее выполнялись трёхслойными (изоляционный, арматурный и рабочий слой). Наличие теплоизоляционного слоя, как показали исследования, отрицательно сказывается на стойкости стен. Наличие арматурного ряда полезно, так как при этом более полно вырабатывается рабочий ряд кладки. Исходя из современных представлений, целесообразно футеровку боковых стен выполнять двухслойной, состоящей из арматурного и рабочего рядов [2]. Зинуров И.Ю. и др. [2] на основании обобщения опыта эксплуатации ДСП различной ёмкости рекомендуют толщины арматурного и рабочего рядов боковых стен приведенные в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Толщина арматурного и рабочего рядов боковых стен ДСП (по Зинурову И.Ю.)

$G, т$	4 – 8	9 – 20	21 – 35	36 – 55	56 – 75	76 – 100
Верхняя часть рабочего ряда (δ'_{cm}), мм	230	230	300	300	300	300 - 380
Нижняя часть рабочего ряда (δ'_{cm}), мм	300 - 380	300 - 380	380	380	460	460
Арматурный ряд, мм	65	65	65	115	115	115

Рекомендации Егорова А.В. [9] по толщине боковых стен ДСП приведены в таблице 1.5

Таблица 1.5 – Толщина боковых стен ДСП (по Егорову А.В.)

G, т	6	12	25	50	100
Верхняя часть рабочего слоя, мм	230	230	300	300	380
Нижняя часть рабочего слоя, мм	300	380	380	460	460
Арматурный ряд, мм	65	65	65	115	115

Внутренний диаметр кожуха определяется:

1) на уровне откосов

$$D_{к.от} = D_{от} + 2 \cdot \delta'_{см} \quad (1.30)$$

2) на уровне пят свода

$$D_{к.св} = D_{от} + 2 \cdot (h_1 \operatorname{tg} \alpha_1 + (h_2 - h_1) \operatorname{tg} \alpha_2 + (h_3 - h_2) \operatorname{tg} \alpha_3 + \delta''_{см}), \quad (1.31)$$

где $\delta'_{см}$ – толщина боковой стенки на уровне откосов, мм;

$\delta''_{см}$ – толщина боковой стенки на уровне пят свода, мм.

Толщина стенки кожуха ДСП δ_k , мм равна [3]

1) для печей ёмкостью 6 – 200 т

$$\delta_k = D_{от} / 200 \quad (1.32)$$

2) для печей ёмкостью 0,5 – 3 т

$$\delta_k = \left(\frac{1}{150 \div 180} \right) D_{от} \quad (1.33)$$

В практике работы дуговых сталеплавильных печей с футеровкой известны три типа подин:

набивные на базе использования магнезитового порошка (встречаются на печах малой ёмкости);

из магнезитового кирпича;

комбинированные (нижняя часть выложена магнезитовым кирпичом, а верхняя – набивная).

При проектировании печей толщину футеровки подины обычно принимают равной глубине ванны жидкого металла, на печах малой и средней ёмкости и имеет тенденцию уменьшения на печах большой ёмкости [11]. Если печи оборудованы устройством электромагнитного перемешивания металла, толщина подины уменьшается до величины

$$\delta_n = (0,75 \div 0,85) \cdot H_m \quad (1.34)$$

Исходя из заданной ёмкости ДСП толщину подины определяют по формуле [3]

$$\delta_n = (0,39 \div 0,40) \cdot \sqrt[3]{G} \quad (1.35)$$

Рекомендации по толщине подин для печей ёмкостью 5 – 100 т, разработанные И.Ю. Зинуровым и др. [10] на основании обобщения опыта эксплуатации печей на заводах качественной металлургии приведены в таблице 1.6.

В рекомендациях А.В. Егорова [9] для ДСП ёмкостью 6÷100т рабочая часть кладки подины состоит только из периклазового кирпича (несколько рядов размером 230×115×65 мм) с общей толщиной 295÷575 мм. Рекомендуемая толщина слоев подины для разных емкостей ДСП согласно Егорову А.В. приведены в таблице 1.7.

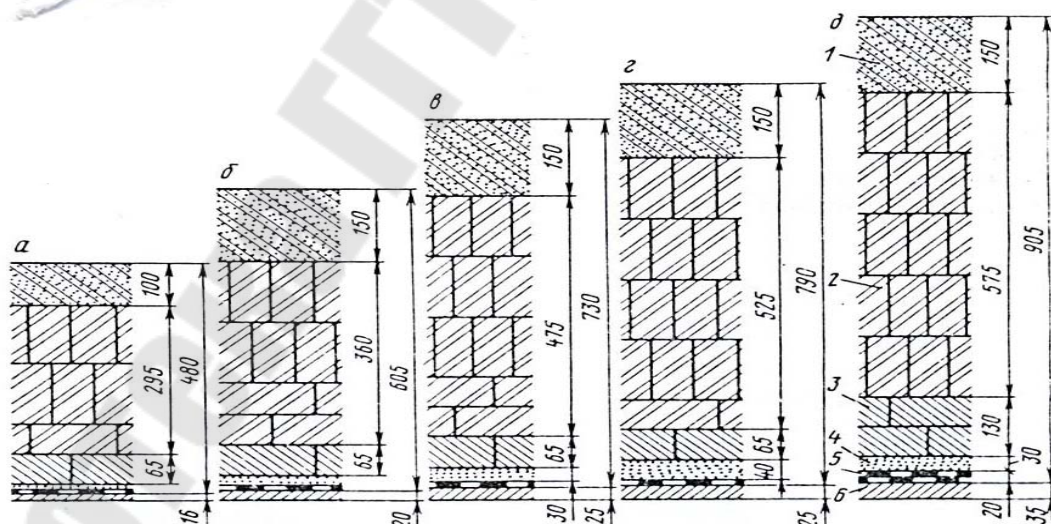
Таблица 1.6 – Толщина слоев подин ДСП (по И.Ю. Зинурову)

G, т	4 – 8	9 – 20	21 – 35	36 – 55	56 – 75	76 – 100
Подина: -набивной слой, мм;	245-415	305-365	100	100	150	150
-рабочая часть, мм;	0-115	0-115	395-445	445-495	430-480	480-530
-теплоизо- ляционный слой, мм.	85	85	105	105	170	170
Общая толщина, мм	450-500	500-550	600-650	650-700	750-800	800-850

Таблица 1.7 – Толщина слоев подин ДСП (по Егорову А.В.)

	6	12	25	50	100
Подина:					
-набивной слой, мм;	100	150	150	150	150
-рабочая часть, мм;	295	360	475	525	575
-теплоизоляционный слой, мм.	85	85	105	115	180
Общая толщина, мм	480	595	730	790	905

При изготовлении подины печи днище кожуха покрывают одним или двумя слоями листового асбеста (10÷20мм), наносят выравнивающий слой шамотного порошка (10÷40мм), на который указывают один или два ряда шамотного кирпича на плашку (65÷130мм). Далее при изготовлении огнеупорного слоя могут быть различные варианты, некоторые [9,10] из них приведены выше. На рисунке 1.3 приведены примеры изготовления подины ДСП, рекомендуемые А. В. Егоровым [9]. Существуют и другие способы изготовления подин [12, 13].



1 – набивной рабочий слой из периклазового порошка; – периклазовый кирпич; – шамотный кирпич; – шамотный порошок; – листовой асбест; – днище кожуха.

2

Рисунок 1.3 – Футеровка подины ДСП емкостью 6 т (а), 12 т (б), 25 т (в), 50 т (г), 100÷200 т (д)

Ширина рабочего окна печи принимается [6]

$$b = (0,2 \div 0,3)D_{om} \quad (1.36)$$

Высота окна составляет по данным [3]

$$h = (0,65 \div 0,70) \cdot b \quad (1.37)$$

при стреле арки

$$\Delta h = (0,13 \div 0,14) \cdot b \quad (1.38)$$

По данным [14] ширина рабочего окна печи составляет

$$b = (0,22 \div 0,33)D_{om} \quad (1.39)$$

Для ДСП весьма важным размером с точки зрения теплообменных процессов является отношение $D_{p.э}/D_{om}$. Диаметр распада электродов ($D_{p.э}$) характеризует расположение электрических дуг в рабочем пространстве печи.

Л.Е. Никольский и др. [2] рекомендуют при конструировании печей придерживаться следующей величины отношения

$$D_{p.э}/D_{om} \leq 0,35 \quad (1.40)$$

Для определения диаметра распада электродов (диаметр окружности, проходящей через оси электродов) А.В.Егоров [9] предлагает следующую формулу

$$D_{p.э} = (0,2 \div 0,3)D_{om} \quad (1.41)$$

По данным [3] отношение $D_{p.э}/D_{om}$ выбирается в зависимости от диаметра электрода $d_э$ и принимается согласно таблицы 1.8.

Таблица 1.8 - $D_{p.э}/D_{om}$ в зависимости от диаметра электрода

$d_э$, мм	100÷300	300÷500	>500
$D_{p.э}/D_{om}$	0,35	0,33	0,3

Диаметр электродного отверстия на своде (d_0) определяется [3]

$$d_0 = d_s + 2\Delta d, \quad (1.42)$$

где $\Delta d = 10$ мм при $d_s = 100 \div 300$ мм, $\Delta d = 15$ мм при $d_s = 300 \div 500$ мм и $\Delta d = 20$ мм при $d_s > 500$ мм.

В случае выбора цилиндрической формы кожуха, его размеры определяются после вычерчивания масштабного эскиза печи с учётом рекомендаций относительного угла вставки конической части кожуха (рисунок 1.4).

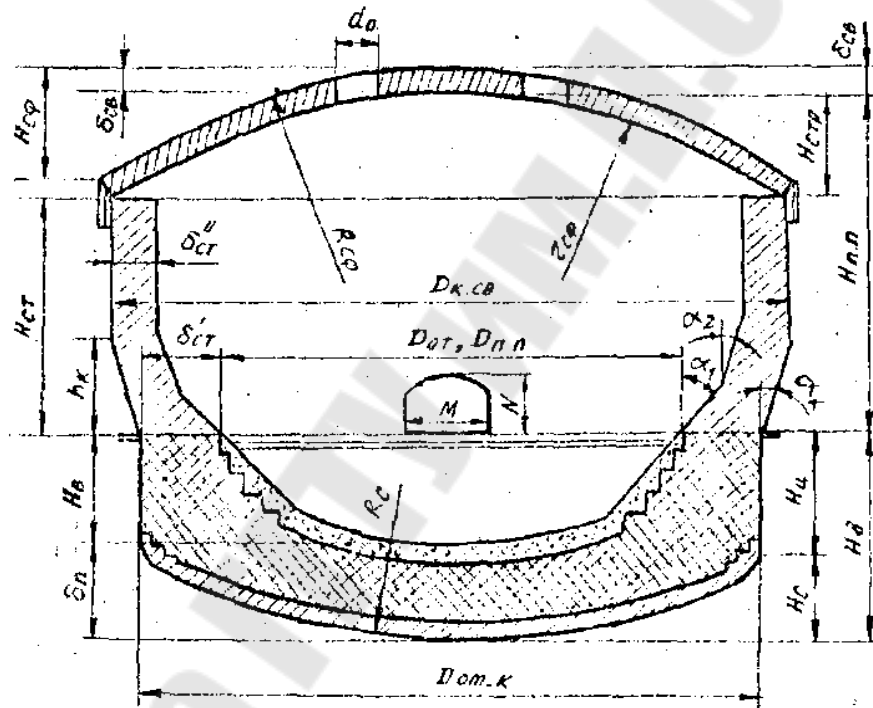


Рисунок 1.4 – Разрез ванны ДСП

1.2 Энергетический баланс и выбор мощности трансформатора

Выбор мощности электропечного трансформатора производится на основании энергетического баланса печи [15] в период расплавления.

Суммарное количество электрической энергии, которую необходимо выделить в период расплавления, находят из выражения [3, 6]

$$W_{эл} = \frac{W_{пол} + (Q_{\phi} + Q_{изл} + Q_c) \cdot \tau_p + Q_{пр} \cdot \tau_{пр} - W_{экз}}{\eta_{эл}}, \quad (1.43)$$

где $W_{пол}$ – полезная энергия для расплавления завалки, кВт·ч;
 $Q_{ф}$ – тепловые потери через футеровку печи, кВт;
 $Q_{изл}$ – тепловые потери излучением из печи, кВт;
 $Q_{г}$ – тепловые потери с выходящими газами, кВт;
 τ_p – длительность периода расплавления, ч;
 $Q_{пр}$ – тепловые потери в период межплавочного простоя, кВт;
 $\tau_{пр}$ – длительность межплавочного простоя, ч;
 $W_{экз}$ – энергия экзотермических реакций в период расплавления, кВт·ч;
 $\eta_{эл}$ – электрический к.п.д. установки в период расплавления, который для большинства крупных ДСП составляет 0,88 - 0,91.

По известным необходимому расходу электроэнергии на расплавление и длительности расплавления под током определяется средняя мощность ($P_{ср}$, кВт·ч) в период расплавления [3, 6]

$$P_{ср} = \frac{W_{эл}}{\tau_{р.м}}, \quad (1.44)$$

где $\tau_{р.м}$ – длительность расплавления под током, т.е. длительность за вычетом времени, в течение которого печь не потребляет электроэнергии в период расплавления, ч.

1.2.1 Определение полезной энергии для нагрева и расплавления металла и шлака

Энергия, необходимая для нагрева, расплавления и перегрева скрапа и шлакообразующих материалов определяется

$$W_{пол} = W_1 + W_2 + W_3, \quad (1.45)$$

где W_1 – энергия для нагрева и расплавления скрапа, кВт·ч;
 W_2 – энергия для перегрева расплавленного металла, кВт·ч;
 W_3 – энергия для нагрева, расплавления шлакообразующих материалов, кВт·ч;

Удельная энергия, необходимая для нагрева до температуры плавления, для расплавления и перегрева до заданной температуры 1 тонны стального лома определяется по формуле [3, 5]

$$w_m = c_1 \cdot (t_{пл} - t_0) + \lambda + c_2 \cdot (t_{пер} - t_{пл}), \quad (1.46)$$

где c_1 – средняя удельная теплоёмкость материала в интервале от начальной температуры до температуры плавления, кВт·ч/(т·°C);
 $t_{пл}$ – температура плавления, °C;
 t_0 – начальная температура, °C;
 λ – скрытая теплота плавления, кВт·ч /т;
 c_2 – средняя удельная теплоёмкость жидкого материала в интервале от температуры плавления до заданной температуры перегрева, кВт·ч/(т·°C);
 $t_{пер}$ – заданная температура перегрева, °C.

Значения скрытой теплоты плавления, температуры плавления, температуры перегрева и средних удельных теплоёмкостей скрапа при разных температурах, необходимых для вычисления удельной энергии, следует брать из справочников и учебников. Например, по данным [2] для шихты, состоящей преимущественно из лома чёрных металлов с содержанием углерода 0,1÷0,4%: $t_{пл}=15000C$; $c_1=0,193$ кВт·ч/(т·°C); $c_2 = 0,23$ кВт·ч/(т·°C); $\lambda = 79$ кВт·ч/т. По данным [14] $\lambda = 0,284$ МДж/кг.

Для ДСП с верхней механизированной загрузкой могут быть приняты значения удельных расходов электроэнергии на расплавление 1 тонну твёрдой завалки малоуглеродистой стали приведенные в таблице 1.9 [6].

Таблица 1.9 – Удельный расход электроэнергии на 1 тонну твердой завалки малоуглеродистой стали

G, t	0,5 – 1,5	3 – 6	12 – 25	50 – 100	200 – 400
$w_m,$ кВт·ч/т	480- 460	450 – 440	435 – 425	420 – 410	405 – 395

Энергия, необходимая для нагрева и расплавления скрапа, W_1 кВт·ч [3]

$$W_1 = G_{загр} \cdot c_1 (t_{пл} - t_0) + G_{жс} \cdot \lambda_{жс}, \quad (1.47)$$

где $G_{загр}$ – масса загружаемого в печь скрапа, т;

$G_{жс}$ – масса жидкого металла в конце периода плавления, т.

Масса, загружаемого в печь скрапа с учётом угара металла и потерь со шлаком определяется по формуле

$$G_{\text{загр}} = \frac{G_{\text{жс}}}{1 - \frac{K_n}{100}}, \quad (1.48)$$

где K_n – потери металла, равные 3%.

Энергия необходимая для перегрева расплавленного металла [3]

$$W_2 = G_{\text{жс}} \cdot c_2 (t_{\text{неп}} - t_{\text{пл}}) \quad (1.49)$$

Заданная температура перегрева $t_{\text{неп}}$ жидкого металла к концу периода расплавления зависит от способа ведения технологического процесса плавки. Так, при совмещении периода расплавления с началом окислительного периода обычно перегревают приблизительно на 50°C выше его температуры плавления, а в некоторых случаях перегрев металла в период расплавления не производится.

Энергия, необходимая для нагрева и расплавления шлакообразующих материалов, а также для перегрева расплавленного шлака [3]

$$W_3 = G_{\text{ш}} (c_{\text{ш}} (t_{\text{неп}} - t_0) + \lambda_{\text{ш}}), \quad (1.50)$$

где $G_{\text{ш}}$ – масса шлака, т;

$c_{\text{ш}}$ – средняя удельная теплоёмкость шлака. По данным [2] для основного шлака $c_{\text{ш}}=0,325$ кВт·ч/(т· $^{\circ}\text{C}$). По данным [3] $c_{\text{ш}}=0,34$ Вт·ч/(кг· $^{\circ}\text{C}$);

$\lambda_{\text{ш}}$ – скрытая теплота плавления шлака. По данным [2] для основного шлака $\lambda_{\text{ш}}=58$ кВт·ч/т. По данным [3] $\lambda_{\text{ш}}=16$ Вт·ч/кг. По данным [14] $\lambda_{\text{ш}}=0,058$ МДж/кг.

По данным [5] удельный расход электроэнергии для расплавления (до 1510°C) углеродистой шихты составляет 370 кВт·ч/т, для перегрева (на 50°C) расплавленного металла – 1,16 кВт·ч/т, для нагрева, расплавления и перегрева шлака – 35 кВт·ч/т.

1.2.2 Определение тепловых потерь через футеровку

Для определения тепловых потерь через футеровку ДСП (Qф) применяют формулы для плоской стенки. Но для упрощения расчётов можно рекомендовать определение удельных тепловых потерь с 1м² футеровки, состоящей из нескольких слоёв [3]

$$q = \frac{t_n - t_{n+1}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_n}{\lambda_n}}, \quad (1.51)$$

где t_n, t_{n+1} – температура внутренней и внешней поверхности стенки, °С;
 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ – толщина слоёв стенки, м;
 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ – коэффициент теплопроводности отдельных слоёв стенки, кВт/(м·°С).

Затем найденные удельные тепловые потери умножают на соответствующие площади внешней поверхности футеровки [3, 14]

$$Q = q \cdot F_{расч}, \quad (1.52)$$

где q – удельные тепловые потери, кВт/м²;
 $F_{расч}$ – расчётная поверхность стенки, м².

1.2.2.1 Тепловые потери через боковые стенки.

Футеровка боковых стен ДСП выполняется двухслойной (арматурный и рабочий) из одного материала, поэтому футеровку стенки можно рассматривать однослойной с общей толщиной $\delta_{см}$, которая может быть по высоте различной стенки различной толщины ($\delta'_{см}, \delta''_{см} \dots$).

Для расчёта тепловых потерь через стенку печи необходимо знать:

- 1) вид огнеупорных материалов;
- 2) коэффициент теплопроводности огнеупорных материалов;
- 3) коэффициент теплоотдачи с внешней стенки печи в окружающую среду,
- 4) геометрические размеры стенки печи.

Расчёт удельных тепловых потерь стен ($q'_{см}, q''_{см} \dots$) ведётся отдельно для каждой стены по высоте, отличающейся по толщине футеровки ($\delta'_{см}, \delta''_{см} \dots$)

$$q_{cm} = \frac{t_1 - t_2}{\delta'_{cm} / \lambda_{cm}}, \quad (1.53)$$

где t_1 – температура внутренней поверхности футеровки, $^{\circ}\text{C}$;
 t_2 – температура внешней поверхности кожуха печи, $^{\circ}\text{C}$.

При проектировании ДСП температура внутренней поверхности футеровки t_1 принимается равной температуре печи (для стен и свода) или металла в ванне (для подины) по результатам расчёта теплообмена в рабочем пространстве печи или принимается по практическим данным, приведённым в справочнике или литературе [2, 14]. Температура наружной поверхности кожуха t_2 зависит от рабочей температуры в печи, толщины и теплопроводности материала кладки. Поэтому определяют методом последовательных приближений. Задав предварительно t_2 , находят среднюю температуру футеровки $t_{cp} = (t_1 + t_2)/2$, по которой находят коэффициент теплопроводности данного материала. Значение найденного удельного потока тепловых потерь через стенку q'_{cm} сравнивают со значением теплоотдачи с единицы наружной поверхности кожуха в окружающую среду (q'_0).

Если

$$q'_{cm} = q'_0 \quad (1.54)$$

или расхождение не превышает 10% [14], принятое значение t_2 можно считать верным и пересчетов не требуется. Если расхождение больше, то необходимо задаваться другим значением t_2 и провести пересчет.

В случае выбора цилиндрикоконического кожуха, составными частями которого являются цилиндр и усеченный конус (рисунок 1.4), расчетная теплоотдающая поверхность боковой стенки печи определяют по следующим формулам

$$F_1 = 2\pi R H_1, \quad (1.55)$$

$$F_2 = \frac{\pi H_2}{\cos \alpha} (R_1 + R_2), \quad (1.56)$$

где H_1 , H_2 – соответственно высота цилиндра и усеченного конуса,
 м;

R – радиус основания цилиндра, м;
 R_1, R_2 – радиусы оснований усеченного конуса, м.

После вычисления величины тепловых потерь ($Q'_{cm}, Q''_{cm} \dots$) для различных по высоте участков с различной толщиной футеровки ($\delta'_{cm}, \delta''_{cm} \dots$), определяют суммарные тепловые потери стены печи

$$Q_{cm} = Q'_{cm} + Q''_{cm} + \dots \quad (1.57)$$

1.2.2.2 Тепловые потери через футеровку свода

При определении тепловых потерь через однослойную футеровку свода сначала выбирают огнеупорный материал и его толщину в зависимости от заданной емкости печи.

После установления температуры внутренней поверхности футеровки свода t_1 , определяют методом приближения значения температуры внешней поверхности свода t_2 . По формуле (1.51) определяют удельные тепловые потери через футеровку свода. Проверяют выполнение условия (1.54).

Рассчитывают теплоотдающую поверхность свода $F_{св}$ как поверхность сферического сегмента радиусом $R_{сф}$ и высотой $H_{сф}$ (рисунок 1.4)

$$F_{св} = 2\pi \cdot R_{сф} \cdot H_{сф}, \quad (1.58)$$

где

$$R_{сф} = r_{сф} + \delta_{св} = \frac{D_{св}^2 + 4H_{сф}^2}{8H_{сф}} \quad (1.59)$$

По формуле (1.52) находят значение тепловых потерь через футеровку свода печи ($Q_{св}$).

1.2.2.3 Тепловые потери через футеровку подины

После определения по формулам (1.34, 1.35) общей толщины трехслойной футеровки подины, с учетом вышеприведенных рекомендаций и тенденций развития ДСП, определяют толщину и материал каждого слоя, количество рядов и способы кладки кирпичей.

Для упрощения расчетов принимают:

1) общую толщину $\delta_{раб}$ набивного и рабочего слоев, так как в них применяется один и тот же материал и один коэффициент теплопроводности $\lambda_{раб}$;

2) общую толщину теплоизоляционного слоя $\delta_{уз}$ и коэффициент теплопроводности $\lambda_{уз}$.

Удельные тепловые потери через подину определяют

$$q_n = \frac{t_1 - t_3}{\frac{\delta_{раб}}{\lambda_{раб}} + \frac{\delta_{уз}}{\lambda_{уз}}}, \quad (1.60)$$

где t_1 – температура внутренней поверхности футеровки подины, определяемая температурой жидкого металла, $^{\circ}\text{C}$;

t_3 – температура внешней поверхности кожуха подины, $^{\circ}\text{C}$.

$$\lambda_{раб} = a \pm b(t_1 + t_2)/2, \quad (1.61)$$

$$\lambda_{уз} = a \pm b(t_2 + t_3)/2, \quad (1.62)$$

где a, b – коэффициенты;

t_2 – температура пограничного слоя между рабочим и изоляционными слоями футеровки подины, $^{\circ}\text{C}$.

Расчет по формуле (1.60) считается правильным при $q_n = q_0$ или расхождение не превышает 10%. Если это условие не выполняется, то производится пересмотр ранее принятых значений t_2, t_3 и вычисление q_n повторяется до удовлетворения условий (1.54).

Из рисунка 1.4 принимается, что внешняя поверхность футеровки подины F_n состоит из поверхности сферического сегмента

$$F_c = 2\pi \cdot R_c \cdot H_c = \pi \frac{D_{к.ом}^2 + 4H_c^2}{4} \quad (1.63)$$

и поверхности цилиндра

$$F_u = 2\pi \cdot R_u \cdot H_u = \pi \cdot D_{к.ом} \cdot H_u \quad (1.64)$$

Определяют тепловые потери через футеровки подины

$$Q_n = q_n \cdot F_n \quad (1.65)$$

Искомые суммарные тепловые потери через футеровку подины печи составляют

$$Q_{\phi} = Q_{cm} + Q_{cv} + Q_n \quad (1.66)$$

1.2.3 Определение тепловых потерь излучением через рабочее окно

Тепловые потери излучением через рабочее окно ($Q_{изл}$, кВт) определяются по формуле [3]

$$Q_{изл} = q_{изл} \cdot \varphi \cdot F_{изл} \quad (1.67)$$

где $q_{изл}$ – удельные тепловые потери излучением (кВт/м) с поверхности, имеющей температуру t , в окружающую среду с температурой 20°C при приведенном коэффициенте излучения $c = 4,65 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}^4)$;

φ – коэффициент диафрагмирования оконного проема, учитывающий экранирующее действие внутренних поверхностей футеровки оконного проема, зависит от соотношения ширины и высоты отверстия, от толщины стенки.

F – тепловоспринимающая поверхность дверцы рабочего окна, м^2 .

1.2.4 Определение тепловых потерь с выходящими из печи газами

В печь воздух поступает через неплотности, нагревается и уходит.

Большое количество газов образуется при подаче кислорода в период расплавления для «подрезки» шихты на откосах ванны, а также при использовании топливно-кислородных горелок для ускорения нагрева и плавления скрапа. Причем, чтобы избежать дополнительного угара металла, топливо в факеле горелок недожигают, что приводит к увеличению тепловых потерь. Поэтому определение потерь тепла с уходящими газами представляет собой значительные трудности, особенно для проектируемых печей.

Тем не менее, если воспользоваться среднестатистическими данными по выходу (V_2) из печи первичных газов с учетом подсоса воздуха (который для 5 т печи составляет $700 \text{ м}^3/\text{ч}$, для 10 т – $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$, для 20 т – $2200 \text{ м}^3/\text{ч}$, для 40 т – $4000 \text{ м}^3/\text{ч}$, для 100 т – $8000 \text{ м}^3/\text{ч}$) можно выполнить ориентировочный расчет по следующей формуле [3, 5]

$$Q_z = c_z(t_n - t_0) \cdot G_z, \quad (1.68)$$

где c_z – средняя удельная теплоемкость газа в диапазоне температур от t_0 до t_n , т.е. для $t_{cp} = (t_n + t_0)/2$;
 t_n – рабочая температура печи, $^{\circ}\text{C}$;
 t_0 – температура поступающего в печь газа, $^{\circ}\text{C}$;
 G_z – масса проходящего через печь газа, кг/ч.

Масса газа выходящего из печи определяется

$$G_z = V_z \cdot \rho_z, \quad (1.69)$$

где ρ_z – плотность газа при нормальных условиях, кг/м³.

1.2.5 Определение тепловых потерь в период межплавочного простоя

Во время межплавочного простоя тепловые потери ДСП складываются из потерь через футеровку, потерь излучением через окно, потерь раскрытой печи при загрузке печи и при подвалке.

Если две первые составляющие тепловых потерь в период межплавочного простоя принимают, как и в период расплавления, то потери с газами считают равными половине аналогичных потерь периода расплавления. Потери тепла при загрузке и подвалке шихты относят к неучтенным потерям, из-за трудности их расчета.

С учетом вышесказанного тепловые потери в период межплавочного простоя можно определить [3, 5]

$$Q_{np} = (Q_{\phi} + Q_{изл} + 0,5 \cdot Q_z) \cdot K_{н.п}, \quad (1.70)$$

где Q_{ϕ} – потери тепла через футеровку в период расплавления, кВт;
 $Q_{изл}$ – потери тепла излучением через рабочее окно в период расплавления, кВт;

Q_z – потери тепла с выходящими из печи газами в период расплавления, кВт

$K_{н.п}$ – коэффициент неучтенных потерь, равный 1,1 – 1,2.

1.2.6 Определение тепла экзотермических реакций в период расплавления

Тепло экзотермических реакций можно определить по материальному балансу. Однако точность его расчета невысокая, так как весьма трудно установить начальную массу элементов в шихте из-за разнородности скрапа. Выгорание элементов зависит от количества кислорода поданного в печь. При недостатке кислорода элементы будут выгорать не полностью, а при большом его избытке начинает усиленно гореть железо. Поэтому определение тепла экзотермических реакций в период расплавления принимают по опубликованным данным испытаний аналогичных печей. Так, при отсутствии ввода в ванну кислорода доля тепла экзотермических реакций составляет 8 – 12% (для малых ДСП), а с применением кислорода эта величина для периода плавления в крупных ДСП достигает 18,8 – 40,7% [14].

Тепло, выделенное в печи от окисления графитированных электродов, можно определить также только ориентировочно, несмотря на то, что взвешиванием можно точно установить массу израсходованных электродов и известен тепловой эффект окисления графита до CO_2 , ибо не вся масса израсходованных электродов сгорает в печи. Часть углерода электродов окисляется лишь до окиси, часть уносится с газами в виде сажи. Поэтому считают, что тепло от окисления электродов составляет 4% общего прихода тепла [14].

Тепло экзотермических реакций определяют приблизительно по формуле [3]

$$W_{\text{экз}} = (K'_{\text{экз}} + K''_{\text{экз}}) \cdot W_{\text{пол}}, \quad (1.71)$$

где $K'_{\text{экз}}$ – коэффициент, учитывающий относительную долю тепла экзотермических реакций;

$K''_{\text{экз}}$ – коэффициент, учитывающий относительную долю тепла при окислении углерода электродов.

1.2.7 Энергетический баланс периода плавления

Суммарное количество электрической энергии, необходимое в период расплавления находят по формуле (1.43).

Длительность периода расплавления τ_p складывается из времени пребывания печи под током $\tau_{p.m}$ и продолжительности довалки одной (0,10 ÷ 0,13) или двух бадей стального лома при выключенной печи.

Длительность межплавочного простоя, необходимая на выпуск металла в ковш, заправку и загрузку шихты, для крупных печей составляет $0,25 \div 0,3$ ч.

Длительность расплавления шихты под током ($\tau_{p.m}$, ч) определяется по формуле [3]

$$\tau_{p.m} = \frac{w_m}{\eta'_{эл} \cdot \eta_m \cdot \cos \varphi \cdot K_{исп}} \cdot \left(\frac{S}{G} \right), \quad (1.72)$$

где w_m – удельная энергия, определенная по формуле (1.46); $\eta'_{эл}$ – электрический к.п.д., равный 0,94; η_m – тепловой к.п.д., равный 0,82;

$\cos \varphi$ – средний коэффициент мощности электропечной установки в период расплавления, который для ДСП большой емкости равен $0,68 - 0,72$;

$K_{исп}$ – коэффициент использования мощности печного трансформатора в период расплавления, равный $0,8 - 0,9$;

S/G – удельная номинальная мощность, $кВА/т$.

По данным [2] мощность отнесенная на 1 т металлошихты, т.е. удельная мощность, выраженная через номинальную мощность трансформатора, в зависимости от емкости ДСП составляет величину приведенную в таблице 1.10.

Таблица 1.10 - Номинальная мощность трансформатора, в зависимости от емкости ДСП

Емкость печи, т	0,5 - 20	20 - 50	> 50
Удельная мощность, $кВА/т$:	600 – 650	400 – 450	250 – 300
– обычная	1000 – 1200	800 – 900	500 – 600
– сверхвысокая			

1.2.8 Определение мощности печного трансформатора

Выбор мощности электропечного трансформатора производится на основании энергетического баланса печи в период расплавления металлошихты. По вычисленным значениям суммарной электроэнергии $W_{эл}$ в период расплавления плавки и длительности расплавления под током $\tau_{p.m}$ по формуле (1.44) определяется средняя мощность $P_{ср}$ в период расплавления.

Зная среднюю активную мощность P_{cp} периода расплавления, можно определить необходимую кажущуюся мощность печного трансформатора (S' , кВт), из выражения

$$S' = \frac{P_{cp}}{K_{исп} \cdot \cos\varphi} \quad (1.73)$$

На основании значения S' следует выбрать ближайшее стандартное значение номинальной мощности печного трансформатора по таблице 1.11.

Таблица 1.11 – Стандартные значения номинальной мощности печных трансформаторов

Номинальная мощность, МВА	4+ 20%	8+ 20%	12,2+ 20%	20+ 20%	32+ 20%	50+ 20%	80+ 20%	125
Номинальное первичное напряжение, кВ	6; 10	6; 10	10; 35	35	35	35	35	110
Предельное значение вторичного напряжения, В	281- 118	318-120	370- 130	407- 144	465- 159	590- 200	750- 250	825- 320

По принятому значению номинальной мощности трансформатора необходимо произвести уточненные расчеты длительности расплавления под током $\tau_{p.m}$ (формула 1.72), суммарного количества электрической энергии $W_{эл}$ периода расплавления (формула 1.43), а также удельный расход электроэнергии на 1 т жидкого металла $W'_{y\delta}$ и на 1 т металлической шихты $W''_{y\delta}$.

Определить удельный расход электроэнергии на 1 т жидкого металла ($W'_{y\delta}$, кВт) и на 1 т металлической шихты ($W''_{y\delta}$, кВт) можно по формуле

$$W'_{y\delta} = \frac{W'_{эл}}{G_{жид}} \quad (1.74)$$

$$W''_{y\delta} = \frac{W'_{эл}}{G_{загр}} \quad (1.75)$$

Высшую ступень вторичного линейного напряжения современных ДСП различной мощности можно описать корреляционной зависимостью типа

$$U_{2.l.g.} = k \cdot S^n \quad (1.76)$$

По методике Н.В. Огорокова и Ф.П. Еднерала при $n = 0,33$:

1) для крупных печей $k=160 \div 180$;

2) для малых печей $k= 180 \div 200$.

По Л.Е. Никольскому при $n = 0,25$, $k = 210 \div 260$ (S – в МВА)

При $n = 0,25$ $K= 36 \div 46$ если S – в кВА

Каждая дуга в трехфазной печи находится под фазным напряжением, которое в $\sqrt{3}$ раз меньше линейного напряжения, приложенного между электродами [4]

$$U_{2ф.г} = U_{2.l.g.} / \sqrt{3} \quad (1.77)$$

Отношение высшей ступени вторичного линейного напряжения к низшей

$$\frac{U_{2.l.g.}}{U_{2.l.g.}} = 2 \div 4 \quad (1.78)$$

принято называть глубиной регулирования напряжения трансформатора.

Для каждой ступени вторичного напряжения трансформатора можно построить кривые зависимости электрических потерь, полезной мощности и электрического к.п.д. печной установки в зависимости от тока электрода. Эти кривые называются рабочими характеристиками печи [3, 6].

1.3 Выбор типа и определение размеров электрода

Для подвода электроэнергии в рабочее пространство ДСП применяют графитированные электроды. Электроды должны обладать высокой электропроводностью, низкой теплопроводностью, повышенной температурой начала окисления на воздухе, малым содержанием золы и серы, высокой механической прочностью и хорошей обрабатываемостью.

Одним из важных показателей качества электродов является допустимая плотность тока j (A/cm^2), т.е. пропускная способность тока. По допустимой плотности тока можно рассчитывать диаметр электрода ($d_э$, см) [2]

$$d_э = \sqrt{\frac{4I_э}{\pi \cdot j}}, \quad (1.79)$$

где $I_э$ – сила тока в электроде, А;
 j – плотность тока, A/cm^2 .

Допустимые плотности тока электродов марок ЭГО и ЭГ1 приведены в таблице 1.12.

Таблица 1.12 - Допустимые плотности тока электродов марок ЭГО и ЭГ1

$d_э$, мм	100	200	300	400	500	610
j , A/cm^2	32	23	19	16	15	12-14

Допустимые значения тока по ГОСТ 4426 – 80 приведены в таблице 1.13.

Для электродов марок ЭГОА и ЭГОА1 допускается увеличение плотности рабочего тока на 10 – 15%. Электроды для сверхмощных печей имеют повышенное качество и допускают плотность тока до $30 A/cm^2$, что позволяет поднять ток в электроде диаметром 555 мм до 77,6 кА и в электроде диаметром 610 мм до 88 кА. Это позволяет довести питание трехфазной ДСП до мощности $115 \div 130 MVA$ и более. Например, 400 т печи США оборудованы трансформатором мощностью 162 MVA со ступенями вторичного напряжения 600 – 840 В. Через электрод диаметром 610 – 710 мм пропускается ток величиной до 100 – 110 кА [2].

Таблица 1.13 - Допустимые значения тока по ГОСТ 4426 – 80

$d_э$, мм	100	200	300	400	500	610	710
$I_э$, кА	2,35	6,9	12,7	20,1	28,5	31,0-42,2	44,0-50,0

Ток (А), протекающий в электроде, для трехфазных печей устанавливается по $S_{ном}$ и $U_{2л.в}$ [4, 5]

$$I_3 = \frac{S_{ном} \cdot 10^3}{U_{2.л.в} \cdot \sqrt{3}}, \quad (1.80)$$

где $S_{ном}$ – номинальная мощность трансформатора, кВА.

По величине I_3 определяется диаметр электрода, см [4]

$$d_3 = \sqrt[3]{\frac{0,406 \cdot I_3^2 \cdot \rho_3}{W}}, \quad (1.81)$$

где ρ_3 – удельное электросопротивление электрода, Ом·см;

W – мощность, отводимая поверхностью электрода в окружающее пространство, равная при 500⁰С 2,1 Вт/см².

Подбирается стандартный диаметр электрода и для него определяется плотность тока, А/см²

$$j = \frac{I_3}{\pi \cdot d_3^2 / 4} = \frac{4I_3}{\pi \cdot d_3^2}, \quad (1.82)$$

Длину электрода l_3 ДСП определяют по формуле

$$l_3 = H_в + H_{н.п} + \delta_{св} + H_{охл} + H_{э.д} + H_{зан} + (100 \div 150), \quad (1.83)$$

где $H_в$ – полная глубина ванны, мм;

$H_{н.п}$ – высота плавильного пространства, мм;

$\delta_{св}$ – толщина свода, мм;

$H_{охл}$ – высота выступающей над сводом части уплотнителя-охлаждителя электродного отверстия в своде, мм;

$H_{э.д}$ – высота корпуса электрододержателя, мм;

$H_{зан}$ – запас длины электрода на одну-две плавки, мм;

100÷150 – запас длины электрода на случай «роста» футеровки свода при нагреве, мм.

В таблице 1.14 приведены значения удельных электросопротивлений электродов.

Таблица 1.14 - Значения удельных электросопротивлений электродов

$d_э$, мм	Удельное электросопротивление, Ом·см		
	ЭГОО, ЭГООА	ЭГО, ЭГОА	ЭГ, ЭГА
75-200	7,5	7,6-8,0	8,1-10,0
250-400	8,0	8,1-9,0	9,1-10,0
450-555	8,0	8,1-9,0	9,1-12,5
610		8,0	9,0

Высота $H_{охл}$ определяется

$$H_{охл} = a \cdot d_э \quad (1.84)$$

где a – коэффициент, равный 0,3÷0,6 (меньшее значение для больших диаметров электрода).

Высота корпуса электрододержателя

$$H_{эл} = 1,2 \cdot d_э \quad (1.85)$$

Запас длины электрода

$$H_{зан} = 420 \frac{m_э \cdot G \cdot N}{\rho_{эл} \cdot d_э^2}, \quad (1.86)$$

где $m_э$ – средний расход электродов на 1 т жидкой стали, 5÷7 кг/т;

G – масса садки, т;

N – число плавов;

$\rho_{эл}$ – объемная масса электрода, равная 1550 – 1600 кг/м³;

$d_э$ – диаметр электрода, м

1.4 Расчет электрических параметров печи

Электрический режим дуговой печи определяется следующими основными параметрами:

- 1) вторичным напряжением электропечного трансформатора;
- 2) током, протекающим в электроде;

3) суммарными индуктивным и активным сопротивлениями печной установки.

1.4.1 Определение активных сопротивлений

Активное сопротивление R вызывает потери мощности в силовой цепи питания, снижая электрический к.п.д. (η_3) и эффективность работы ДСП.

Электрические потери имеют место в силовом и вспомогательном электрооборудовании на токоподводах на стороне высокого напряжения (ВН) и стороне низкого напряжения (НН), в электрододержателях и электродах.

При расчетах электрических параметров проектируемых ДСП определяют активное сопротивление всех элементов силовой цепи, приводя их к силе тока НН. При таком пересчете активные сопротивления сети, дросселя и обмотки ВН трансформатора оказываются настолько малыми, что им можно пренебречь.

Определение активных и индуктивных сопротивлений представляет собой сложную задачу, поэтому выполняем упрощенным способом.

Установленные опытным путем суммарное активное сопротивление R силовой цепи НН и его распределения по участкам для некоторых ДСП характеризуются значениями (Ом·м/ %).

Вычислив значение активного сопротивления какого-нибудь участка, например, электродов (R_3), которые имеют одинаковое расположение во всех трехэлектродных печах с круглой формой ванны, можно определить суммарное активное сопротивление контура на стороне НН.

Активное сопротивление проводника (электрода) при протекании постоянного тока выражается формулой

$$R'_3 = \rho_3 \frac{l'_3}{S'_3}, \quad (1.87)$$

где ρ_3 – удельное электросопротивление электрода, Ом·м;

l'_3 – расчетная длина проводника (средняя длина от нижнего конца электрода до середины корпуса электрододержателя), м; S'_3 – площадь поперечного сечения электрода (m^2) с учетом «обсасывания» его (определяется по формуле $d'_3 = d_3$).

Активное сопротивление проводника при протекании переменного тока выражается формулой

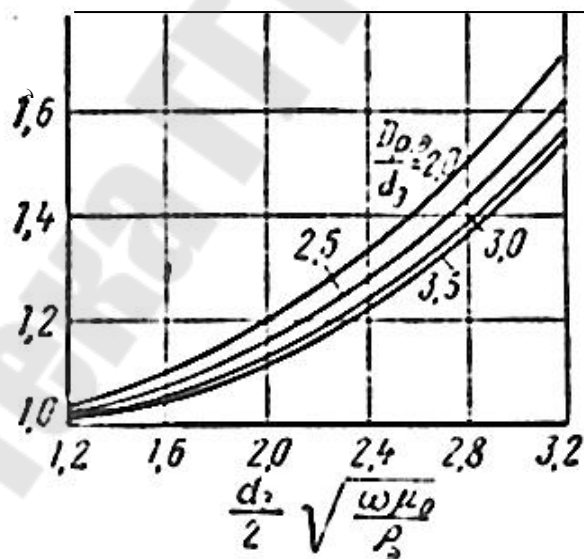
Таблица 1.15 - Активное сопротивление по участкам ДСП, Ом·м/ %

Емкость печи	Трансформатор	Короткая сеть	Электрод	Всего
5	0,210/19,8	0,380/31,1	0,52/49,5	1,06/100
25	0,100/10,9	0,320/34,8	0,50/54,3	0,92/100
50	0,082/7,4	0,400/36,2	0,62/56,4	1,10/100
100	0,081/11,4	0,240/34,2	0,38/54,3	0,70/100
200	0,087/15,7	0,183/33,3	0,28/51,0	0,55/100

$$R_s = K_d \cdot R'_s, \quad (1.88)$$

где K_d – коэффициент добавочных потерь.

Для электродов печных установок коэффициент добавочных потерь может быть определен по кривым рисунка 1.5 применительно к условиям токораспределения по сечению электродов, расположенных своими осями на окружности диаметром $D_{p.э}$.



d'_s – расчетный диаметр электрода, м; ω – угловая частота, равная $2\pi f$ ($f=50$ Гц); μ_0 – магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; ρ_s – удельное электросопротивление электрода, Ом·м.

Рисунок 1.5 – Значения коэффициента добавочных потерь электродов в зависимости от $0,5 \cdot d'_s \sqrt{\omega \mu_0 / \rho_s}$ для различных отношений диаметра распада к диаметру электрода.

1.4.2 Определение индуктивных сопротивлений

Индуктивное сопротивление (X) имеет особое значение для работы ДСП. От величины индуктивного сопротивления зависит условия непрерывного горения дуги. Однако излишнее сопротивление X снижает коэффициент мощности, уменьшает потребляемую активную мощность, загружает питающую сеть избыточной реактивной мощностью.

Индуктивное сопротивление X определяют как сумму сопротивлений трех участков НН:

- 1) трансформатора X_m ;
- 2) короткой сети $X_{к.с}$;
- 3) электрода $X_э$.

Наиболее стабильной частью суммарного индуктивного сопротивления является индуктивное сопротивление электрода, изменяющееся в узких пределах порядка $17 \div 19\%$ от общей суммы. Определив индуктивное сопротивление электрода $X_э$, находят суммарное индуктивное сопротивление X контура на стороне НН.

Индуктивное сопротивление участка цепи определяется действующей индуктивностью L и частотой переменного тока f .

Действующая индуктивность состоит из собственной индуктивности и взаимной индуктивности

$$L_1 = L_{11} - 0,5(M_{12} + M_{13}), \quad (1.89)$$

где L_{11} – собственная индуктивность проводника, мкГн;

M_{12}, M_{13} – взаимная индуктивность между двумя любыми проводниками, мкГн;

Собственная индуктивность прямолинейного проводника, (L_{11} , мкГн)

$$L_{11} = 2l \left(\ln \frac{2l}{g_{11}} - 1 \right) \cdot 10^{-3}, \quad (1.90)$$

где l – длина проводника (электрода), см;

g_{11} – среднее геометрическое расстояния площади поперечного сечения проводника от самой себя, см.

Среднее геометрическое расстояние площади поперечного сечения проводника от самой себя для круга диаметром d' , определяется

$$g_{11} = 0,779 \frac{d'}{2}, \quad (1.91)$$

Взаимные индуктивности прямолинейных проводников определяются по формуле, (M_{12} и M_{13} , мкГн)

$$M_{12} = M_{13} = 2l \left(\ln \frac{2l}{g_{12}} - 1 \right) \cdot 10^{-3}, \quad (1.92)$$

где g_{12} – среднее геометрическое расстояние между проводниками кругового сечения (см), равное расстоянию между их осями.

Среднее геометрическое расстояние между проводниками кругового сечения определяется

$$g_{12} = g_{13} = h = 0,886 \cdot D_{p,з} \quad (1.93)$$

Индуктивное сопротивление электрода ($X_э$, Ом·м) определяется

$$X_э = 0,314 \cdot L_1 \quad (1.94)$$

1.4.3 Определение электрического режима

Основными показателями электрического режима ДСП являются [6]

Полная мощность, МВА

$$S = 3U_{2ф.в} \cdot I_э, \quad (1.95)$$

где $U_{2ф.в}$ -высшая ступень вторичного напряжения электропечного трансформатора, кВ.

Реактивная мощность, МВА

$$Q = 3I_э^2 \cdot X, \quad (1.96)$$

где $I_э$ – ток, протекающий в электроде, *кА*.

X – индуктивное сопротивление, *Ом*.

Активная мощность, *МВт*

$$P = \sqrt{S^2 - Q^2} \quad (1.97)$$

Коэффициент мощности

$$\cos\varphi = P/S \quad (1.98)$$

Мощность электрических потерь, *МВт*

$$P_{э.л} = 3I_э^2 \cdot R, \quad (1.99)$$

где R – активное сопротивление, *Ом*.

Мощность нагрева (дуги), *МВт*

$$P_n = P - P_{э.л} \quad (1.100)$$

Электрический к.п.д.

$$\eta_э = P_n/P \quad (1.101)$$

Мощность тепловых потерь, *МВт*

$$P_{m.n} = f(I_э) \approx const \quad (1.102)$$

Полезная мощность, *МВт*

$$P_{пол} = P_n - P_{m.n} \quad (1.103)$$

Электрических характеристик ДСП недостаточно для определения оптимального режима печи, обеспечивающие высокие технико-экономические показатели. Технический уровень электропечной установки оценивают в первую очередь значениями таких технико-экономических показателей, как

1) часовая производительность, $m/ч$

$$G = P_{пол} / 340 \quad (1.104)$$

2) удельный расход электроэнергии на единицу массы продукции, $кВт·ч/т$

$$W_{уд} = P / G \quad (1.105)$$

а также следующими технологическими параметрами:

3) время плавления одной тонны стали, $ч$

$$\tau_p = \frac{1}{G} = \frac{340}{P_{пол}} \quad (1.106)$$

4) полный (общий) к.п.д. печи

$$\eta_0 = \eta_m \cdot \eta_s = \frac{340}{W_{уд}} = \frac{340G}{P}, \quad (1.107)$$

где 340 кВт·ч/т – теоретическое количество энергии, необходимое для расплавления 1 т стали с учетом тепла, аккумулированного кладкой печи в период рафинирования и переданного частично шихте ($\sim 30 - 40 \text{ кВт·ч/т}$).

Для каждой ступени вторичного напряжения трансформатора можно построить кривые зависимости коэффициента мощности, активной мощности, мощности электрических потерь, полезной мощности и электрического к.п.д. печной установки в зависимости от тока электрода. Эти кривые называются рабочими характеристиками печи.

2 ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №1 - ИЗУЧЕНИЕ ОБЛУЧЕННОСТИ ФУТЕРОВКИ НА УРОВНЕ ДУГ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Получить представление о распределении плотности тепловых потоков облучения по периферии внутренней поверхности футеровки стены на уровне дуг.

2. Приобрести практический навык применять метод математического моделирования для изучения теплообмена в дуговых печах.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Основой тепловой работы дуговой печи при заданном энергетическом режиме плавки является рациональное распределение в рабочем пространстве тепловых потоков излучения от электрических дуг в соответствии с тепловоспринимающей способностью ванны, стены и свода.

Одним из методов исследования тепловой работы футеровки является математическое описание и моделирование на ЭВМ теплообмена в рабочем пространстве дуговой печи. При этом определяют величину и распределение облученности по периферии стены в зависимости, например, от расположения графитированных электродов.

В дуговой печи облученность футеровки почти эквивалентна плотности теплового потока q , падающего от дуги в соответствии с законами направления и расстояния:

$$q = k_3 P_d \cos \beta / (4\pi r^2), \quad (2.1)$$

где q - облученность, кВт/м²;

P_d - мощность, излучаемая точечным источником (в дуговой печи - электрическая дуга), кВт;

β - угол между направлением излучения и нормалью к облучаемой площадке футеровки, рад;

r - расстояние от дуги до футеровки при расположении дуги на оси электрода, м;

k_3 - коэффициент, учитывающий неодинаковое излучение дуги в разных направлениях (при $k_3 < 1$ характеризует экранирование излучения) и перенос мощности по фазам.

В трех- или многоэлектродных дуговых печах облученность футеровки суммируется от всех дуг:

$$q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{i=N} q_i = (P_d/4\pi) \sum_{i=1}^{i=N} (k_3 \cos \beta / r^2)_i, \quad (2.2)$$

где $P_d = S_{\text{ном}} \cdot \lambda \cdot \eta_{\text{э}} \cdot k_{\text{и}} / N$;

$S_{\text{ном}}$ - номинальное значение полной мощности дуговой печи, кВт·А;

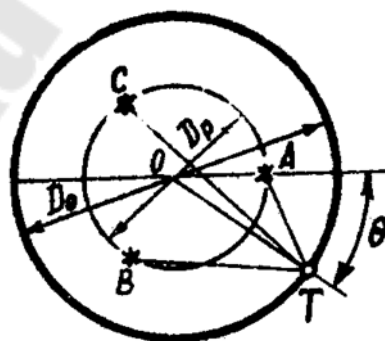
λ - коэффициент мощности;

$\eta_{\text{э}}$ - электрический КПД;

$k_{\text{и}}$ - коэффициент использования номинального значения полной мощности (в условиях решаемой задачи);

N - число дуг (по числу электродов в дуговой печи, т.е. $N = 1$ или 3 или 6).

Математическое описание r_i и β_i получают из соответствующих треугольников (рисунок 2.1) по теореме конусов и по теореме синусов через определяющий размер рабочего пространства дуговой печи - диаметр на уровне откосов ванны D_0 и азимутальный угол θ с учетом относительного диаметра распада электродов $k = D_p / D_0$.



$AT = r_A$, $\angle ATO = \beta_A$ $BT = r_B$, $\angle BTO = \beta_B$ $CT = r_C$, $\angle CTO = \beta_C$

Рисунок 2.1 - Схема рабочего пространства трехэлектродной дуговой печи

Соотношение (2.2) позволяет получить эпюру облученности по периферии футеровки стены на уровне дуг в зависимости от расположения электродов, т. е.

$$q_{\Sigma} = f(\theta; k). \quad (2.3)$$

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Математическая модель теплообмена в дуговой печи реализована на языке Паскаль. Запуск программы из каталога в виде: C:\IZ1\IZ1.EXE.

Выход к программе – по команде: “Shift-F3”

Файлу результатов будущего расчета присваивают имя-идентификатор с расширением “DAT”, например: “AA.DAT”

Переход к следующей строке ввода информации происходит нажатием клавиши «TAB ⇄».

При последующем вводе информации переход к нижней строке (или возврат к верхней строке) происходит нажатием соответствующих клавиш: «↑» или «↓»

Данные для расчета вводятся в следующем порядке (Таблица 2.1):

Таблица 2.1 – Данные для расчета

Обозначение		Наименование величины (параметра)	Единица измерения
на экране	в тексте		
SN	$S_{\text{ном}}$	Номинальное значение полной мощности дуговой печи	МВ·А
DO	D_0	Диаметр рабочего пространства печи на уровне откосов ванны	м
KM	λ	Коэффициент мощности	
KIM	$k_{\text{и}}$	Коэффициент использования номинального значения полной мощности	
KPDE	η_3	Электрический КПД	
KEDH		Нижний предел изменения отношения D_p/D_0	
KEDB		Верхний предел изменения отношения D_p/D_0	
K1	k_{31}	Коэффициент, характеризующий равномерность распределения мощности по фазам и излучения дуги фазы А в пространстве печи	
K2	k_{32}	То же для дуги фазы В	
K3	k_{33}	То же для дуги фазы С	

После ввода 10 величин курсор выводится на «ОК» и данные вводятся в память ЭВМ клавишей «Enter».

Расчет выполняется по команде клавишей «F4».

Результаты расчета выведены в таблице для разных значений $KED = \text{varia}$ (по числу вариантов индивидуального задания участникам выполняемой лабораторной работы) (см. таблица 2.2)

Таблица 2.2 – Расчетные параметры.

Обозначение		Наименование величины (параметра)	Единица измерения
на экране и в протоколе	в тексте Пособия		
KED	k	Относительный диаметр распада электродов	
F	θ	Азимутальный угол (см. рисунок 2.1)	градус
A	r_A	Радиус - вектор АГ (см. рисунок. 2.1)	м
B	r_B	Радиус - вектор ВГ (см. рисунок 2.1)	м
C	r_C	Радиус - вектор СГ (см. рисунок 2.1)	м
$X1$	β_A	Угол АГО (см. рисунок 2.1)	градус
$X2$	β_B	Угол ВГО (см. рисунок 2.1)	градус
$X3$	β_C	Угол СГО (см. рисунок 2.1)	градус
Q	q_Σ	Облученность рассматриваемой элементарной площадки на цилиндрической поверхности футеровки стены на уровне дуг	кВт/м ²

Порядок проведения работы и указания по охране труда.

1. Изучить с помощью демонстрационного плаката алгоритм расчета, номенклатуру, обозначение, единицы измерения, формат и последовательность набора матрицы вводных данных для исследуемой математической модели лучистого теплообмена в дуговой печи.

2. Подготовить исходные данные для математического моделирования данной задачи в виде матрицы вводных данных.

Для проведения данной работы студенты получают групповое и индивидуальные задания.

Групповое задание включает следующую информацию:

- вместимость ДСП m_0 ;
- номинальная мощность трансформатора $S_{ном}$;
- параметры энергетического и электрического режимов рассматриваемого периода плавки (коэффициент использования мощности $k_{и}$, коэффициент мощности λ , электрический КПД $\eta_э$).

Индивидуальное задание включает следующую информацию:

- азимутальный угол θ (в интервале от 0 до 360° с дискретностью 10°);
- соотношение $k = D_p/D_0$ (в интервале от 0 до 0,6 с дискретностью 0,05).

Дополнительную информацию, необходимую для подготовки матрицы вводных данных для ЭВМ, студенты находят самостоятельно из демонстрационных плакатов, имеющихся в лаборатории.

Указания по охране труда

Ознакомиться с оборудованием вычислительной лаборатории, изучить правила техники безопасности при работе на ЭВМ. Необходимо иметь в виду, что при эксплуатации ЭВМ возможно поражение электрическим током. Поэтому все составные части ЭВМ должны быть надежно заземлены, закрыты защитными кожухами, оснащены световыми индикаторами режимов работы.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты расчета облученности футеровки на уровне дуг сформированы в виде протокола, пример которого для двух вариантов задачи показан в приложении.

Контрольный пример. Для дуговой печи вместимостью 25 Мг имеем следующие вводные данные (таблица 2.3)

Таблица 2.3 – Исходные данные контрольного промера

	Вариант 1	Вариант 2
SN, МВ·А	15	15
DO , м	3,54	3,54
KM	0,8	0,8
KIM	0,5	0,5
$KPDE$	0,95	0,95
$KEDH$	0,3	0,3
$KEDB$	0,5	0,5
$K1$	0,9	1,0
$K2$	1,0	1,0
$K3$	1,1	1,0

По результатам расчета облученности футеровки в рамках индивидуального задания

($k = D_p / D_o = \text{const}$) каждый студент:

- строит круговую эпюру облученности футеровки $q_{\Sigma} = f(\theta)$;
- оценивает степень неравномерности тепловой нагрузки футеровки в виде отношения $q_{\max} / q_{\min} > 1$ и заполняет соответствующую строку в таблице 2.4.

Таблица 2.4 - Результаты анализа степени равномерности тепловой нагрузки футеровки дуговой печи вместимостью $m_o = \dots$ Мг с номинальной мощностью трансформатора $S_{\text{ном}} = \dots$ МВ·А; исходные данные: диаметр $D_o = \dots$ м, мощность дуги $P_d = \dots$ кВт

Отношение $k = D_p / D_o$	Экстремальное значение облученности q , кВт/м ²	Азимутальный угол θ , град	Отношение q_{\max} / q_{\min}
0	$q_{\max} =$		1,00
	$q_{\min} =$		
	$q_{\max} =$		
	$q_{\min} =$		
	$q_{\max} =$		
	$q_{\min} =$		
	$q_{\max} =$		
	$q_{\min} =$		

– выполняет необходимые геометрические построения (в масштабе) аналогичные рисунку 2.1 и определяет соответствующие геометрические характеристики излучения r_i и β_i (с помощью транспортира) для заданной точки футеровки (азимутальный угол θ) на уровне дуг.

В рамках группового задания студенты:

– строят на демонстрационном стенде несколько круговых эпюр облученности при различном расположении электродов ($k = D_p/D_o = \text{varia}$);

– строят на демонстрационном стенде зависимости:

$$q_{\max} = f_1(k);$$

$$q_{\min} = f_2(k);$$

$$q_{\max} / q_{\min} = f_3(k);$$

– путем анализа полученных зависимостей формулируют практические рекомендации по проектированию и эксплуатации дуговой печи, делают прогноз о возможной стойкости футеровки (с учетом результатов эксплуатации печей в ЭСПЦ БМЗ);

– сравнивают полученное значение $k_{\text{рац}} = D_p/D_o$ с литературными данными.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Примеры контрольных вопросов, задаваемых при допуске к работе

1. Возможные схемы направленного теплообмена в рабочем пространстве дуговой печи. Какие поверхности рабочего пространства участвуют в радиационном теплообмене?

2. Охарактеризовать электрическую дугу как источник излучения.

3. Почему в математическом описании радиационного теплообмена в данной лабораторной работе возможно исключить роль футеровки как излучателя?

4. Как рассчитать облученность футеровки? Единицы измерения облученности.

5. Понятие о коэффициенте экранирования $k_э$. В каких случаях работы дуговой печи $k_э < 1$ или $k_э > 1$? Как это связано с параметрами электрического режима работы печи? Роль шлака в схеме лучистого теплообмена дуговой печи.

6. На каких допущениях математического описания радиационного теплообмена построено исследование тепловой нагрузки футеровки в данной лабораторной работе?

7. Как определить мощность дуги при заданном номинальном значении полной мощности трансформатора?

8. Какие геометрические характеристики определяют величину облученности футеровки в данной точке?

Примеры контрольных вопросов, задаваемых при защите работы.

1. Почему облученность футеровки стены дуговой печи связана с расположением электродов? Как это влияет на разрушение футеровки? Примеры топографии износа футеровки.

2. Как можно объяснить круглую (в плане) форму рабочего пространства трехфазной трехэлектродной дуговой печи?

3. Какое теплотехнически рациональное расположение электродов может быть рекомендовано по результатам данной лабораторной работы? Какие конструктивные решения для реализации этих рекомендаций могут быть предложены?

4. Возможные значения облученности футеровки дуговой печи заданной вместимости и мощности в различные периоды плавки.

5. Возможная средняя стойкость футеровки дуговой печи различной вместимости и мощности. Какие конструктивные меры принимают на современных дуговых печах для повышения стойкости?

6. В чем проявляется влияние на тепловую нагрузку футеровки параметров электрического режима работы дуговой печи (степень вторичного напряжения, ток дуги, коэффициент мощности, электрический КПД, коэффициент использования мощности)?

7. Роль шлака в схеме радиационного теплообмена в дуговой печи.

8. Что изменится в схеме радиационного теплообмена в шестиэлектродной дуговой печи? Возможные формы рабочего пространства таких дуговых печей.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №2 - ИЗУЧЕНИЕ ОБЛУЧЕННОСТИ ФУТЕРОВКИ СТЕНЫ РАЗЛИЧНОГО ПРОФИЛЯ ПО ВЫСОТЕ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Получить представление о распределении плотности тепловых потоков облучения по высоте стены дуговой печи (ДП).
2. Приобрести практический навык математического моделирования для изучения теплообмена в рабочем пространстве ДП.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Основой тепловой работы ДП при заданном энергетическом режиме плавки является рациональное распределение в рабочем пространстве тепловых потоков излучения от электрических дуг в соответствии с тепловоспринимающей способностью ванны, стены и свода. Работоспособность огнеупорной футеровки, зависящая от механизма разрушения материала (оплавление или растрескивание), определяется величиной тепловой нагрузки, температурными условиями, физико-химическим взаимодействием с печной атмосферой и т.п. Тепловая нагрузка футеровки стены является следствием теплообменных процессов в «свободном» пространстве печи и, в первую очередь, может быть оценена плотностью теплового потока q , падающего от дуги как «точечного» источника излучения на данную площадку футеровки стены в соответствии с законами направления и расстояния:

$$q = k_3 P_d \cos \beta / (4 \pi r^2), \quad (2.4)$$

где q - облученность, кВт/м²; P_d - мощность дуги, кВт;
 β - угол между направлением излучения и нормалью к облучаемой площадке футеровки стены, рад;
 r - расстояние от дуги до облучаемой площадки, м;
 k_3 - коэффициент, учитывающий неодинаковое излучение дуги в разных направлениях (при $k_3 < 1$ характеризует экранирование излучения) и перенос мощности по фазам.

В трех- или многоэлектродных ДП облученность футеровки суммируется от всех дуг:

$$q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{i=N} q_i = (P_{\text{д}} / 4\pi) \sum_{i=1}^{i=N} (k_{\Sigma} \cos\beta / r^2)_i, \quad (2.5)$$

где $P_{\text{д}} = S_{\text{ном}} \lambda \cdot \eta_{\text{э}} \cdot k_{\text{и}} / N$;

$S_{\text{ном}}$ - номинальное значение полной мощности ДП, кВт·А;

λ - коэффициент мощности;

$\eta_{\text{э}}$ - электрический к.п.д.;

$k_{\text{и}}$ - коэффициент использования мощности;

N - число дуг (по числу электродов в дуговой печи, т.е. $N = 1$ или 3 или 6).

Изучение тепловой нагрузки футеровки стен целесообразно проводить для участка футеровки против любого электрода, например, против электрода фазы А. В этом случае азимутальный угол $\theta = 0$ и $q_{\Sigma} = q_{\text{max}}$. Геометрические характеристики излучения r_i и β_i в формуле (2.5) выражают при заданном расположении электродов ($k = D_{\text{р}} / D_0 = \text{const}$) через определяющий размер рабочего пространства дуговой печи — диаметр на уровне откосов ванны D_0 и относительную высоту положения рассматриваемой площадки футеровки стены $h_r = h / D_0$.

Соотношение (2.5) позволяет получить эпюру облученности футеровки стены дуговой печи различного профиля по высоте, т. е.

$$q_{\Sigma} = f(h_r). \quad (2.6)$$

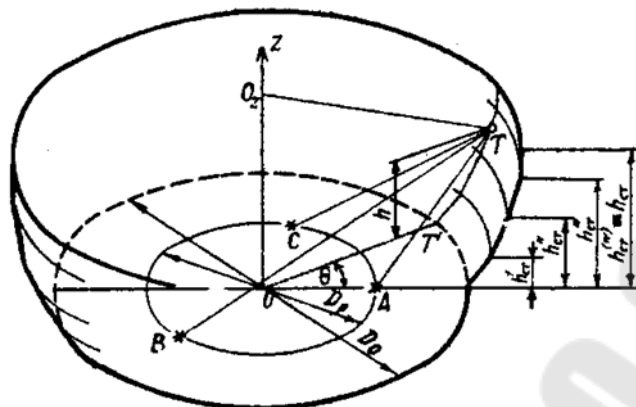
ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Математическая модель теплообмена в дуговой печи реализована на языке Паскаль в виде программы “IZ2” объемом 148576 Bytes.

Файлу результатов будущего расчета присваивают имя-идентификатор с расширением “DAT”, например: “AA.DAT”

Переход к следующей строке ввода информации происходит нажатием клавиши «ТАВ ⇄ ».

При последующем вводе информации переход к нижней строке (или возврат к верхней строке) происходит нажатием соответствующих клавиш: «↑» или «↓»



$$AT = r_A, \quad BT = r_B, \quad CT = r_C, \quad \angle ATO_z = \beta_A, \quad \angle BTO_z = \beta_B, \\ \angle CTO_z = \beta_C \quad h_{ct}^I = k_{ct}^I \cdot D_0 \quad h_{ct}^{II} = k_{ct}^{II} \cdot D_0 \quad h_{ct}^{III} = k_{ct}^{III} \cdot D_0 \\ h_{ct}^{(IV)} = k_{ct}^{(IV)} \cdot D_0$$

Рисунок 2.2 - Схема “свободного” пространства трехэлектродной дуговой печи.

Данные для расчета вводятся в следующем порядке (таблица 2.6):

Таблица 2.6 – порядок ввода данных

Наименование величины (параметра), обозначение на экране	Обозначение в тексте
Вместимость МО, Мг	m_o
Номинальная мощность трансформатора SN, МВ·А	$S_{ном}$
Число дуг-источников излучения N	N
Коэффициент мощности КМ	λ
Коэффициент использования мощности Ким	$k_{и}$
Электрический коэффициент полезного действия Кпдэ	$\eta_э$
Диаметр рабочего пространства на уровне откосов D_0 , м	D_0
KED	k
K1	$k_{э1}$
K2	$k_{э2}$
K3	$k_{э3}$

После ввода 11 величин курсор выводится на «ОК» и данные вводятся в память ЭВМ клавишей «Enter». На экране устанавливается новая страница (таблица 2.7).

Таблица 2.7 – порядок ввода данных

Наименование величины (параметра), обозначение на экране	Обозначение в тексте
KST 2S аналогично для второго яруса	$k_{ст}^{II}$
KST 3S аналогично для третьего яруса	$k_{ст}^{III}$
KST 4S аналогично для четвертого яруса	$k_{ст}^{IV}$
Alf 1S угол наклона образующей внутренней поверхности первого яруса футеровки стены к вертикали, градус	α^I
Alf 2S аналогично для второго яруса, градус	α^{II}
Alf 3S аналогично для третьего яруса, градус	α^{III}
Alf 4S аналогично для четвертого яруса, градус	α^{IV}
DKST шаг изменения относительной высоты	Δh_r
F, азимутальный угол, градус	θ

После ввода 10 величин курсор выводится на «ОК» и данные вводятся в память ЭВМ клавишей «Enter». Расчет выполняется по команде клавишей «F4».

Результаты расчета выведены в таблице для разных значений относительной высоты стены $h_m = \text{varia}$ с шагом $\Delta k_{ст}$ (т.е. DKST) по числу вариантов индивидуального задания участникам выполняемой лабораторной работы:

Таблица 2.8 – порядок ввода данных

Обозначение		Наименование величины (параметра)	Единица измерения
на экране и в протоколе	в тексте Пособия		
KST	h_r	Относительная высота рассматриваемой элементарной площадки футеровки стены	
A	r_A	Радиус - вектор АТ (см. рисунок 2.2)	м
B	r_B	Радиус - вектор ВТ (см. рисунок 2.2)	м
C	r_C	Радиус - вектор СТ (см. рисунок 2.2)	м
X1	β_A	Угол АТО (см. рисунок 2.2)	градус
X2	β_B	Угол ВТО (см. рисунок 2.2)	градус
X3	β_C	Угол СТО (см. рисунок 2.2)	градус
Q	q_{Σ}	Облученность рассматриваемой элементарной площадки на цилиндрической поверхности футеровки стены	кВт/м ²

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И УКАЗАНИЯ ПО ОХРАНЕ ТРУДА

1. Изучить с помощью демонстрационного плаката алгоритм расчета, номенклатуру, обозначение, единицы измерения и последовательность набора матрицы вводных данных для исследуемой математической модели лучистого теплообмена в дуговой печи.

2. Подготовить вводные данные для математического моделирования данной задачи в виде матрицы вводных данных.

Для проведения данной работы студенты получают групповое и индивидуальные задания.

Групповое задание включает следующую информацию

- вместимость ДП m_0 ;
- номинальная мощность трансформатора $S_{\text{ном}}$;
- параметры энергетического и электрического режимов рассматриваемого периода плавки (коэффициент использования мощности $k_{\text{и}}$, коэффициент мощности λ , электрический КПД $\eta_{\text{э}}$);
- вариант расположения электродов (соотношение $k = D_{\text{р}}/D_0$).

Индивидуальное задание включает следующую информацию:

- профиль и конструкция футеровки;
- относительная высота заданной точки футеровки, т. е. h_r .

Дополнительную информацию, необходимую для подготовки матрицы вводных данных для ЭВМ, студенты находят самостоятельно из демонстрационных плакатов и атласа, имеющихся в лаборатории.

Указания по охране труда

Ознакомиться с оборудованием вычислительной лаборатории, изучить правила техники безопасности при работе на ЭВМ. Необходимо иметь в виду, что при эксплуатации ЭВМ возможно поражение электрическим током. Поэтому все составные части ЭВМ должны быть надежно заземлены, закрыты защитными кожухами, оснащены световыми индикаторами режимов работы.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ
(по распечатке результатов расчета)

Результаты расчета облученности футеровки на уровне дуг сформированы в виде протокола, пример которого для двух вариантов задачи показан в приложении.

Контрольный пример

Для ДП вместимостью 25 Мг имеем следующие данные:

	ДП второго поколения	ДП четвертого поколения
МО, Мг	25	25
SN, МВ·А	15	32
N	3	3
КМ	0,8	0,8
Ким	0,4	0,4
Кпдэ	0,9	0,9
Do	3,54	3,54
КED	0,35	0,25
К1	0,85	0,95
К2	1,00	1,00
К3	1,15	1,05

Введено данных: 11

11

KST 1S	0,10	0,45
KST 2S	0,20	0,45
KST 3S	0,35	0,45
KST 4S	0,45	0,45
Alf 1S, градус	25	0
Alf 2S, градус	20	0
Alf 3S, градус	10	0
Alf 4S, градус	0	0
DKST	0,05	0,05
F, градус	0	180

Введено данных: 10

10

По результатам расчета облученности футеровки в рамках индивидуального задания каждый студент:

- строит эпюру облученности футеровки стены заданного профиля по высоте в координатах « $h_r - q_{\Sigma}$ » для наиболее теплонагруженной зоны, т.е. против электрода (когда азимутальный угол $\theta = 0, 2\pi/3$ или $4\pi/3$);

- выполняет необходимые геометрические построения (в масштабе) для заданной точки футеровки на относительной высоте и определяет геометрические характеристики излучения, например, для дуги А (см. рисунок 2.2) в виде r_A и β_A (с помощью транспортира),

- заполняет соответствующую строку таблицы 2.9 .

Таблица 2.9 - Результаты анализа облученности футеровки стены различного профиля дуговой печи вместимостью $m_o = \dots$ Мг с номинальной мощностью трансформатора $S_{ном} \dots$ МВ·А Исходные данные — мощность дуги $P_d = \dots$ кВт диаметр $D_o = \dots$ м

Профиль стены	Облученность , кВт/м ² , при h/D_o									Прогноз стойкости
	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	
Цилиндрическая										100%
Коническая										
% снижения										
Сложный профиль										
% снижения										

В рамках группового задания студенты:

- строят на демонстрационном стенде эпюры облученности футеровки по высоте стены различного профиля;

- оценивают относительное изменение облученности и объясняют причины наблюдаемых явлений;

- формулируют практические рекомендации по проектированию рабочего пространства ДП, делают прогноз возможной стойкости футеровки стены и сравнивают с литературными данными.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Примеры контрольных вопросов, задаваемых при допуске к работе

1. Возможные схемы направленного теплообмена в рабочем пространстве ДП. Какие поверхности рабочего пространства участвуют в радиационном теплообмене?

2. Какие температурные условия службы футеровки стены в ДП? Требования к огнеупорному материалу футеровки. Какой огнеупорный материал применяют для футеровки стены ДП второго поколения?

3. На каких допущениях математического описания радиационного теплообмена построено исследование тепловой нагрузки футеровки стены в данной лабораторной работе?

4. Как рассчитать облученность футеровки стены? Единицы измерения облученности.

5. Как определить мощность дуги как источника излучения при заданном номинальном значении полной мощности трансформатора?

6. Какие геометрические характеристики определяют величину облученности в данной точке футеровки стены ?

7. Стены какого профиля и какой конструкции применяют на ДП обычной, повышенной, высокой и сверхвысокой мощности? Преимущества и недостатки.

8. Средняя стойкость футеровки стен ДП разной вместимости и различной мощности. Причины и механизм разрушения огнеупорной футеровки стены ДП.

Примеры контрольных вопросов, задаваемых при защите работы

1. Почему тепловая нагрузка футеровки конической стены и стены сложного профиля меньше, чем для цилиндрической стены?

2. Какой профиль стены и почему может быть рекомендован для повышения стойкости огнеупорной футеровки ?

3. Сравнить преимущества и недостатки стен различного профиля. Дать прогноз ожидаемой стойкости огнеупорной футеровки.

4. Какой профиль стен и почему может быть рекомендован для сверхмощной ДП с водоохлаждаемыми элементами футеровки?

5. Какова протяженность по высоте так называемого «горячего пояса» футеровки стен различного профиля? Возможные способы горячего ремонта огнеупорной футеровки стены ДП второго поколения.

6. Как определить теплотехнически рациональную высоту стены? Что может служить технико-экономическим обоснованием такой рекомендации?

7. В чем проявляется влияние на тепловую нагрузку футеровки стен параметров электрического режима работы ДП (степень вторичного напряжения, ток дуги, коэффициент мощности, электрический КПД, коэффициент использования мощности)?

8. Возможные значения облученности футеровки стены дуговой сталеплавильной печи заданной вместимости и мощности в различные периоды плавки.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №3 - РАСЧЕТ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИ РАЦИОНАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА ДУГОВОЙ ПЕЧИ ЗАДАННОЙ ВМЕСТИМОСТИ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Закрепить теоретический материал лекции по курсу «Расчет и проектирование электропечей».

Приобрести навык инженерного расчета теплотехнически рациональных геометрических размеров рабочего пространства дуговых печей путем выполнения домашнего задания, курсового и дипломного проектов по разделу «Техника производства».

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Рациональные геометрические размеры рабочего пространства дуговых печей (ДП) определяют по соотношениям, полученным из анализа условий теплообмена в ванне жидкого металла и в «свободном» пространстве.

Для заданной вместимости ДП m_0 (по массе жидкого металла) находят необходимый объем металлической ванны V_M :

$$V_M = m_0 / d_{\text{ж}}, \quad (2.7)$$

где $d_{\text{ж}} = 6,9 \dots 7,2 \text{ Мг/м}^3$ — плотность жидкой стали;

$1/d_{\text{ж}} = 0,14 \dots 0,146 \text{ м}^3/\text{Мг}$ — удельный объем жидкой стали.

Наиболее распространенным типом ванны ДП является сфероконическая ванна, объем которой состоит из объема V_K усеченного конуса высотой (глубиной) h_K , обращенного бóльшим основанием диаметром D_M вверх, и объема $V_{\text{ш}}$ шарового сегмента высотой (глубиной) $h_{\text{ш}}$ и диаметром основания $D_{\text{ш}}$, равного диаметру нижнего меньшего основания конической части ванны:

$$V_M = V_K + V_{\text{ш}} = \frac{\pi h_K}{12} (D_M^2 + D_M D_{\text{ш}} + D_{\text{ш}}^2) + \frac{\pi h_{\text{ш}}}{6} (0,75 D_{\text{ш}}^2 + h_{\text{ш}}^2). \quad (2.8)$$

Коническая поверхность ванны образует так называемые «откосы» ванны и характеризуется углом θ между образующей и горизонталью. Учитывая величину угла естественного откоса сухого

периклазового порошка, применяемого для заправки подины ДП, порядка 30...35°, обычно делают

$$\theta = 45^\circ, \quad (2.9)$$

чтобы во время эксплуатации ДП подина не «зарастала».

Высота (глубина) шарового сегмента, необходимого для накопления жидкого металла под электродами при проплавлении «колодцев» в твердой металлозавалке, составляет $1/5 \dots 1/4$ от глубины металлической ванны h_M , т. е.

$$h_{ш} = k_{ш} \cdot h_M = (0,2 \dots 0,25) h_M. \quad (2.10)$$

С учетом вышеизложенного:

$$V_M = \frac{\pi h_M^3}{24} [3(2 - k_{ш}) K^2 - 12(1 - k_{ш}) K + 4(2 - 3k_{ш} + 2k_{ш}^3)], \quad (2.11)$$

где $k_{ш} = h_{ш} / h_M$;

$K = D_M / h_M$ — соотношение основных геометрических размеров D_M и h_M металлической ванны, которые выбирают по теплотехническим и технологическим требованиям:

для малых ДП, с кислой футеровкой $K = 3,5 \dots 4,5$;

для крупных ДП $K = 4,5 \dots 6,5$.

Таким образом, глубина металлической ванны:

$$h_M = A \sqrt[3]{m_0}; \quad (2.12)$$

диаметр зеркала металлической ванны

$$D_M = K h_M = K A \sqrt[3]{m_0}, \quad (2.13)$$

где $A = \sqrt[3]{\frac{24}{\pi \cdot d_{ж} / 3(2 - k_{ш})K^2 - 12 \cdot (1 - k_{ш})K + 4(2 - 3k_{ш} + 2k_{ш}^3)}}$ — коэффициент формы металлической ванны ДП.

Глубину металлической ванны h_M не следует иметь более 1,5 м во избежание ухудшения проведения в ванне массообменных процессов. В таких случаях целесообразно увеличить соотношение K .

Зная D_M и h_M , можно определить размеры элементов металлической ванны ДП:

$$h_{ш} = k_{ш} \cdot h_M = k_{ш} \cdot A \sqrt[3]{m_0}; \quad (2.14)$$

$$h_k = (1 - k_{ш}) h_M = (1 - k_{ш}) \cdot A \sqrt[3]{m_0}; \quad (2.15)$$

$$D_{ш} = D_M - 2h_k = [K - 2(1 - k_{ш})] \cdot A \sqrt[3]{m_0}; \quad (2.16)$$

радиус сферы шарового сегмента

$$r_{сф.п} = 0,5 (0,25 D_{ш}^2 + h_{ш}^2) / h_{ш}. \quad (2.17)$$

Объем шлаковой ванны $V_{шл}$ определяется количеством шлака $m_{шл}$ и достигает 10...20% от объема металлической ванны в зависимости от принятой технологии выплавки стали данной марки:

$$V_{ш} = m_{шл} / d_{шл} = 0,01 \cdot k_{шл} \cdot m_0 / d_{шл} \approx (0,1...0,2) V_M, \quad (2.18)$$

где $d_{шл} = 2,9...3,2 \text{ Мг/м}^3$ — плотность жидкого шлака;

$k_{шл}$ — количество шлака, выражаемое в процентах от массы металла (так называемая «кратность» шлака).

Толщину слоя шлака $h_{шл}$ упрощенно оценивают, пренебрегая конусностью ванны ДП:

$$h_{шл} \approx 4 V_{шл} / (\pi \cdot D_M^2) \approx 1,27 V_{шл} / D_M^2. \quad (2.19)$$

Уровень порога рабочего окна принимают на 20...40 мм выше «зеркала» шлака, т. е.

$$h_3 = 0,02...0,04 \text{ м}. \quad (2.20)$$

Уровень откосов ванны принимают на 30...70 мм выше уровня порога рабочего окна во избежание размывания шлаком основания футеровки стены и ухода металла в плоскости разъема корпуса ДП на уровне откосов ванны, т. е.

$$h_4 = 0,03...0,07 \text{ м}. \quad (2.21)$$

Таким образом, глубина ванны ДП от уровня порога рабочего окна, являющаяся паспортной характеристикой печи, составляет

$$h_p = h_m + h_{шл} + h_3; \quad (2.22)$$

глубина ванны от уровня откосов ванны составляет:

$$h_b = h_m + h_{шл} + h_3 + h_4 = h_p + h_4 \quad (2.23)$$

и определяет такой важный геометрический размер ДП, как диаметр рабочего пространства на уровне откосов ванны D_0 , также являющийся паспортной характеристикой ДП:

$$D_0 = D_m + 2(h_{шл} + h_3 + h_4). \quad (2.24)$$

Расположение графитированных электродов в рабочем пространстве ДП, определяющее расположение электрических дуг как мощных источников теплового излучения на футеровку, характеризуют диаметром D_p окружности, проходящей через оси вертикально расположенных графитированных электродов (так называемый «распад» электродов). Для современных ДП

$$D_p = k_{эд} \cdot D_0 = (0,25...0,3) \cdot D_0, \quad (2.25)$$

где меньшие значения для более крупных ДП высокой и сверхвысокой мощности.

Высоту «свободного» пространства ДП как расстояние от уровня откосов ванны до верха стены (или, что то же самое, до пят свода) $h_{ст}$ определяют из соотношения (см. [1], формула 61):

$$h_{ст} = k_{ст} \cdot D_0 = (0,35...0,45) \cdot D_0, \quad (2.26)$$

принимая меньшие значения для ДП большой вместимости, особенно в случае двухразовой загрузки металлошихты с насыпной плотностью $0,8...1 \text{ Мг/м}^3$, а большие значения – для ДП малой вместимости или в случае единовременной загрузки специально подготовленной металлошихты с насыпной плотностью до $1,5...1,6 \text{ Мг/м}^3$.

Условие единовременной загрузки

$$V_{раб} \geq V_{ш}, \quad (2.27)$$

где $V_{ш} = k_3 \cdot k_p \cdot m_0 / d_{ш}$;

$V_{\text{раб}} = V_{\text{в}} + V_{\text{св.пр}}$;
 $d_{\text{ш}}$ - насыпная плотность металлошихты; Мг/м³;
 $k_{\text{р}}$ - расходный коэффициент металлошихты на 1 Мг жидкого металла, Мг / Мг;
 k_3 - коэффициент, учитывающий технологию загрузки металлошихты, т. е. $k_3 = 1$ при загрузке в один прием при тяжеловесной шихте или $k_3 = 0,6 \dots 0,8$ при загрузке в два и более приема («подвалкой») более легковесной металлошихты;

$V_{\text{в}} = V_{\text{м}} + \frac{\pi}{12} (h_{\text{шл}} + h_3 + h_4) \cdot (D_{\text{м}}^2 + D_{\text{м}} \cdot D_0 + D_0^2)$ - объем ванны на уровне откосов;

$V_{\text{св.пр}} = \frac{\pi}{12} [h_{\text{ст}}^I \cdot D_0^2 + h_{\text{ст}}^I \cdot D_0 D^I + h_{\text{ст}}^{II} \cdot (D^I)^2 + (h_{\text{ст}}^{II} - h_{\text{ст}}^I) \cdot D^I D^{II} + (h_{\text{ст}}^{III} - h_{\text{ст}}^I) \cdot (D^{II})^2 + (h_{\text{ст}}^{III} - h_{\text{ст}}^{II}) \cdot D^{III} D^{IV} + (h_{\text{ст}} - h_{\text{ст}}^{II}) \cdot (D^{III})^2 + (h_{\text{ст}} - h_{\text{ст}}^{III}) \cdot D^{III} D^{IV} + (h_{\text{ст}} - h_{\text{ст}}^{III}) \cdot (D^{IV})^2]$ - объем «свободного» пространства;

$D^I = D_0 + 2h_{\text{ст}}^I \text{tg } \alpha^I$ - верхний диаметр первого яруса стены;

$D^{II} = D^I + 2(h_{\text{ст}}^{II} - h_{\text{ст}}^I) \text{tg } \alpha^{II}$ - второго -"-";

$D^{III} = D^{II} + 2(h_{\text{ст}}^{III} - h_{\text{ст}}^{II}) \text{tg } \alpha^{III}$ - третьего -"-";

$D^{IV} = D^{III} + 2(h_{\text{ст}} - h_{\text{ст}}^{III}) \text{tg } \alpha^{IV}$ - четвертого -"-";

$h_{\text{ст}}^I = k_{\text{ст}}^I D_0$ - высота первого яруса стены сложного профиля;

$h_{\text{ст}}^{II} = k_{\text{ст}}^{II} D_0$ - второго -"-";

$h_{\text{ст}}^{III} = k_{\text{ст}}^{III} D_0$ - третьего -"-";

$h_{\text{ст}} = k_{\text{ст}} D_0$ - высота стены;

$\alpha^I \dots \alpha^{IV}$ - угол образующей поверхности соответствующего яруса стены с вертикалью. Для цилиндрической стены $\alpha^I = \alpha^{II} = \alpha^{III} = \alpha^{IV} = 0$.

Толщина многослойной футеровки подины ДП

$$\Delta_{\text{п}} = k_{\text{п}} h_{\text{м}}, \quad (2.28)$$

где $k_{\text{п}} \approx 0,75 \dots 0,85$ для ДП, оборудованных установкой ЭМП;

$k_{\text{п}} \approx 1,0$ для ДП, не имеющих установки ЭМП.

Огнеупорная футеровка стены ДП имеет рабочий слой из высокоогнеупорного термостойкого периклазохромитового (типа ПХС) кирпича толщиной $\Delta_{\text{р}} = 460$ мм и арматурный («броневой») слой из хромитопериклазового кирпича марки ХМ, устанавливаемого вдоль кожуха по плашку ($\Delta_{\text{а}} = 65$ мм) или на ребро ($\Delta_{\text{а}} = 115$ мм).

Поэтому внутренний диаметр кожуха на уровне откосов (также паспортная характеристика ДП)

$$D_{\text{к}} = D_0 + 2(\Delta_{\text{р}} + \Delta_{\text{а}}). \quad (2.29)$$

Внутренний диаметр кожуха ДП на уровне пят свода D_{κ}^{IV} зависит от профиля футеровки стены и от формы кожуха. В случае футеровки сложного профиля и коническо-цилиндрического кожуха

$$D_{\kappa 2}^{IV} = D_{\kappa} + 2 h_{\kappa\kappa} \operatorname{tg} \gamma = D_{\kappa 1}^{IV} = D^{IV} + 2 (\Delta_p^{IV} + \Delta_a^{IV}), \quad (2.30)$$

где $h_{\kappa\kappa}$ – высота конической части кожуха, равная $k_{\kappa\kappa} \cdot h_{\kappa} \approx ({}^{1/3} \dots {}^{2/3}) (h_{\text{ст}} + h_4)$

или с учетом (2.21) и (2.26) $({}^{1/3} \dots {}^{2/3}) [(0,35 \dots 0,45) D_0 + h_4]$;

γ – угол наклона образующей конической части кожуха с вертикалью, составляющий $10 \dots 26^\circ$ в зависимости от величины углов $\alpha^I \div \alpha^{IV}$;

Δ_p^{IV} и Δ_a^{IV} – толщина соответственно рабочего и арматурного слоев четвертого яруса футеровки стены.

Внутренний диаметр кожуха ДП на уровне пят свода D_{κ}^{IV} определяет диаметр сводового кольца, поскольку свод ДП опирается на песчаный затвор кожуха, герметизирующий разъем корпуса и свода, т. е.

$$D_{\text{св}} = D_{\kappa}^{IV}. \quad (2.31)$$

Высота центральной точки внутренней поверхности свода зависит от конструкции и формы свода (см. [1]). Для кирпичного сферического (купольного) свода высота подъема («стрела выпуклости») определяется строительной прочностью огнеупорного кирпича, составляя для периклазохромитовых сводов

$$h_{\text{п.с}} = k_{\text{п.с}} D_{\text{св}} = (0,125 \dots 0,15) D_{\text{св}}. \quad (2.32)$$

В случае металлического водоохлаждаемого свода с огнеупорной центральной частью

$$h_{\text{п.с}} \approx k_{\text{п.с}} \cdot 0,5 D_{\text{св}} \approx (0,6 \dots 0,75) D_{\text{св}}. \quad (2.33)$$

Зная $h_{\text{ст}}$ и $h_{\text{п.с}}$, определяют высоту расположения свода относительно уровня откосов ванны:

$$h_{\text{св1}} = h_{\text{ст}} + h_{\text{п.с}}, \quad (2.34)$$

которая должна соответствовать теплотехническим требованиям

$$h_{св2} = k_{св} \cdot D_0 = (0,45...0,6) D_0, \quad (2.35)$$

где меньшая цифра для более крупных ДП.

Толщина футеровки свода $\Delta_{св}$ соответствует длине стандартного кирпича марки ПХСУТ и может быть для ДП различной вместимости m_0 :

m_0 , Мг . . .	до 12	25—50	100	200
$\Delta_{св}$, мм . . .	230	300	380	460

Рабочее окно, необходимое для загрузки материалов по ходу плавки и для наблюдения за состоянием футеровки ДП, имеет следующие размеры:

$$\text{ширина } b = k_b \cdot D_0 = (0,25...0,3) D_0; \quad (2.36)$$

$$\text{высота } h = (0,8...1,2) b = k_h \cdot D_0 = (0,2...0,3) D_0. \quad (2.37)$$

Выпускное окно («летка») делают круглым (\varnothing 120...150 мм) или прямоугольным (150 × 250 мм).

Работа с программой

Математическое описание, изложенное в «теоретическом введении», реализовано для расчета теплотехнически рациональных размеров рабочего пространства ДП объемом 137840 Bytes.

Запуск программы из каталога в виде: C:\DSP\DSP.EXE

Выход к программе – по команде: “Shift-F3”

Файлу результатов будущего расчета присваивают имя-идентификатор с расширением “DAT”, например: “AA.DAT”

Переход к следующей строке ввода информации происходит нажатием клавиши «ТАВ \leftrightarrow ».

При последующем вводе информации переход к нижней строке (или возврат к верхней строке) происходит нажатием соответствующих клавиш: « \uparrow » или « \downarrow »

Данные для расчета вводятся в следующем порядке (таблица 2.10):

Таблица 2.10 – общие данные для расчета размеров рабочего пространства печи

Обозначение на экране/ в протоколе	Наименование величины (параметра, симплекса)	Размерность	в тексте пособия	
			обозначение	№ формулы
МО	Вместимость ДП	Мг	m_0	
Дш	Насыпная плотность металлозавалки (металлошихты)	Мг/м ³	$d_{ш}$	(2.27)
Дж	Плотность жидкого металла	Мг/м ³	$d_{ж}$	(2.6)
Дшл	Плотность жидкого шлака	Мг/м ³	$d_{шл}$	(2.18)
КР / Кр	Расходный коэффициент металлошихты на 1 Мг жидкого металла	Мг/Мг	k_p	(2.27)
Кз	Коэффициент, учитывающий технологию загрузки металлошихты		k_z	(2.27)
Кшл	Кратность шлака	%	$k_{шл}$	(2.18)
Технологические условия:				
МО	Вместимость ДП	Мг	m_0	
Дш	Насыпная плотность металлозавалки (металлошихты)	Мг/м ³	$d_{ш}$	(2.27)
Дж	Плотность жидкого металла	Мг/м ³	$d_{ж}$	(2.6)

Продолжение таблицы 2.10

1	2	3	4	5
Dшл	Плотность жидкого шлака	Мг/м ³	$d_{шл}$	(2.18)
KR / Kp	Расходный коэффициент металлошихты на 1 Мг жидкого металла	Мг/Мг	k_p	(2.27)
Kз	Коэффициент, учитывающий технологию загрузки металлошихты		$k_з$	(2.27)
Kшл	Кратность шлака	%	$k_{шл}$	(2.18)
Геометрические условия. Форма ванны:				
Kш	Соотношение глубины сферического сегмента и жидкометаллической ванны		kш	(2.10), (2.11), (2.14)
Kм	Соотношение диаметра «зеркала» и глубины жидкометаллической ванны		Kм	(2.11)
H3	Высота от «зеркала» шлаковой ванны до уровня порога рабочего окна	мм	h3	(2.14)
H4	Высота от уровня порога рабочего окна до уровня откосов ванны ДП	мм	h4	(2.15)

Окончание таблицы 2.10

1	2	3	4	5
Кп	Соотношение толщины футеровки подины и глубины жидкометаллической ванны		кп	(2.22)
Геометрические условия. Профиль футеровки стены:				
Alf(1'')	Угол наклона образующей внутренней поверхности первого яруса футеровки стены к вертикали	градус	αI	(2.27)
Alf(2'')	Аналогично для второго яруса	градус	αII	(2.27)
Alf(3'')	Аналогично для третьего яруса	градус	αIII	(2.27)
Alf(4'')	Аналогично для четвертого яруса	градус	$\alpha I\zeta$	(2.27)
Кст(1'')	Отношение высоты первого яруса футеровки стены к диаметру рабочего пространства ДП на уровне откосов		кстI	(2.27)
Кст(2'')	Аналогично для второго яруса		кстII	(2.27)
Кст(3'')	Аналогично для третьего яруса		кстIII	(2.27)
Кст(4'')	Аналогично для четвертого яруса		кстIV	(2.27)

После ввода 20 величин курсор выводится на «ОК» и данные вводятся в память ЭВМ клавишей «Enter». На экране устанавливается новая страница (Таблица 2.11).

Таблица 2.11 - данные для расчета размеров рабочего пространства печи
(продолжение)

Обозначение на экране/ в протоколе	Наименование величины (параметра, симплекса)	Размерность	в тексте пособия	
			обозначение	№ формулы
<i>Толщина футеровки и форма кожуха:</i>				
Dea	Толщина арматурного слоя футеровки стены на уровне откосов ванны (первый ярус)	мм	Δ_a	(2.28)
Dep	Толщина рабочего слоя футеровки стены на уровне откосов ванны (первый ярус)	мм	Δ_p	(2.29)
Dea(4 ^{''})	Толщина арматурного слоя футеровки стен на уровне пят свода (четвертый ярус)	мм	Δ_a^{IV}	(2.30)
Dep(4 ^{''})	Толщина рабочего слоя футеровки стены на уровне пят свода (четвертый ярус)	мм	Δ_p^{IV}	(2.30)
KB / Kb	Отношение ширины рабочего окна к диаметру рабочего пространства ДП на уровне откосов ванны		k_b	(2.36)
KN / Kn	Отношение высоты рабочего окна к диаметру рабочего пространства ДП на уровне откосов ванны		k_n	(2.37)
KKK / Kkk	Отношение высоты конической части кожуха к высоте кожуха ДП		k_{kk}	(2.30)
Gam	Угол наклона образующей конической части кожуха с вертикалью	градус	γ	(2.30)
<i>Форма свода и расположение электродов:</i>				
Kcb	Относительная высота центральной точки свода над уровнем откосов ванны ДП		k_{cb}	(2.35)
Kpc	Относительная высота подъема кирпичного купольного (сферического) свода		k_{pc}	(2.31)
Desv	Толщина футеровки свода	мм	Δ_{cb}	
Ked	Соотношение диаметра «распада» графитированных электродов и диаметра рабочего пространства ДП на уровне откосов ванны		$k_{эд}$	(2.25)

После ввода 12 величин курсор выводится на «ОК» и данные вводятся в память ЭВМ клавишей «Enter».

Расчет выполняется по команде клавишей «F4». При просмотре результатов расчета на экране (файл с расширением заданного идентификатора «DAT») необходимо оценить качество входных данных по трем условиям (см. пример протокола расчета): 1. Объем шихты «должен быть меньше», чем объем рабочего пространства печи согласно (2.27);

2. Диаметр кожуха ДП на уровне пят свода должен быть одинаковым («должен быть равен») при расчете через внутренние или наружные размеры ДП согласно (2.30);

3. Высота свода ДП должна быть одинаковой («должна быть равна») при расчете суммированием по (2.34) или по заданному соответствующему симплексу согласно (2.35).

В результаты расчета выведено 37 величин (таблица 2.12) теплотехнически рациональных геометрических размеров рабочего пространства ДП заданной вместимости.

Таблица 2.12 - Результаты расчета

Обозначение на экране/ в протоколе	Наименование величины (параметра, симплекса)	в тексте пособия	
		обозначение	№ формулы
1	2	3	4
<i>Размеры ванны:</i>			
Ншл	Глубина (высота) шарового сегмента	$h_{ш}$	(2.10), (2.14)
Нк	Глубина (высота) конической части объема жидкометаллической ванны ДП	$h_{к}$	(2.15)
Нм	Глубина жидкометаллической ванны ДП	$h_{м}$	(2.12)
Дм	Диаметр основания шарового сегмента	$D_{м}$	(2.13)
Дш	Диаметр основания шарового сегмента	$D_{ш}$	(2.16)

Продолжение таблицы 2.12

1	2	3	4
$R_{сф}$	Радиус сферы шарового сегмента	$r_{сф.п}$	(2.17)
$H_{шл}$	Глубина (толщина) шлаковой ванны	$h_{шл}$	(2.19)
H_p	Глубина ванны ДП от уровня порога рабочего окна (паспортная характеристика ДП)	h_p	(2.22)
$H_в$	Глубина ванны ДП от уровня откосов ванны	$h_в$	(2.23)
Размеры ярусов стены сложного профиля:			
$D(1'')$	Верхний диаметр первого яруса стены	D^I	(2.26)
$D(2'')$	Верхний диаметр второго яруса стены	D^{II}	(2.26)
$D(3'')$	Верхний диаметр третьего яруса стены	D^{III}	(2.26)
$D(4'')$	Верхний диаметр четвертого яруса стены	D^{IV}	(2.26)
$H_{ст}(1'')$	Высота первого яруса футеровки стены сложного профиля над уровнем откосов ванны ДП	$h_{ст}^I$	(2.26)
$H_{ст}(2'')$	Аналогично для второго яруса	$h_{ст}^{II}$	(2.26)
$H_{ст}(3'')$	Аналогично для третьего яруса	$h_{ст}^{III}$	(2.26)
$H_{ст}(4'')$	Аналогично для четвертого яруса	$h_{ст}^{IV}$	(2.26)

Окончание таблицы 2.12

1	2	3	4
<i>Размеры кожуха:</i>			
Dк	Внутренний диаметр кожуха ДП на уровне откосов ванны (паспортная характеристика ДП)	$D_{\text{к}}$	(2.28)
Dек	Толщина кожуха		
Hкк	Высота конической части кожуха ДП	$h_{\text{кк}}$	(2.30)
<i>Размеры свода:</i>			
Dсв	Диаметр свода ДП	$D_{\text{св}}$	(2.29)
Hпс	Высота подъема кирпичного купольного (сферического) свода	$h_{\text{п.с}}$	(2.32)
Rсф.св.	Радиус сферы кирпичного свода, равный: $0,5(0,25 D_{\text{св}}^2 + h_{\text{п.с}}^2) / h_{\text{п.с}}$ (в случае плоского металлического водоохлаждаемого свода радиус условно принят 10^9 мм)	$r_{\text{сф.св}}$	
<i>Размеры рабочего окна:</i>			
Во	Ширина рабочего окна	b	(2.34)
Но	Высота рабочего окна	h	(2.35)

По результатам расчета необходимо выполнить эскиз рабочего пространства ДП заданной вместимости – поперечный или продольный разрез по оси “рабочее окно-выпускное отверстие” и сопоставить с данными проектных организаций или в методических материалах для выполнения курсового проекта, имеющихся в ГГТУ.

4. Контрольные примеры

Для ДП вместимостью 25 Мг имеем следующие данные (таблицы 2.13-2.14) :

Таблица 2.13 – Результаты расчета

	ДП второго поколения	ДП четвертого поколения
Технологические условия:		
МО	25	25
Дш	1,2	1,2
Дж	7,1	7,1
Дшл	3,1	3,1
КР	1,08	1,08
Кз	1,0	0,6
Кшл	5	5
Геометрические условия:		
<i>Форма ванны:</i>		
Кш	0,2	0,25
Км	4,5	3,5
Нз	20	20
Н4	40	40
Кп	0,8	1,0
Профиль футеровки стены:		
Alf(1'')	27	0
Alf(2'')	20	0
Alf(3'')	13	0
Alf(4'')	0	0
Кст(1'')	0,1	0
Кст(2'')	0,2	0
Кст(3'')	0,35	0
Кст(4'')	0,45	0,45
Введено данных:	20	20

Таблица 2.14 – Результаты расчета (продолжение)

Толщина футеровки и форма кожуха:		
Dea	65	65
Dep	380	380
Dea(4")	0	65 (условно)
Dep(4")	300	380 (условно)
KB	0,25	0,25
КН	0,30	0,30
ККК	0,60	0
Gam	16	0
Форма свода и расположение электродов:		
Ксв	0,65	0,45
Кпс	0,143	0
Десв	300	300 (условно)
Кед	0,30	0,25
Введено данных:	12	12

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №4 - РАЗРАБОТКА И ИЗУЧЕНИЕ ГРАФИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕЖИМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПЕРИОДА ПЛАВКИ В ДУГОВОЙ ПЕЧИ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Закрепить материал лекции по курсу «Металлургические электропечи».

Изучить энергетику дуговой печи в технологический период плавки.

Освоить методику разработки графика рационального энергетического режима работы дуговой печи с учетом особенностей технологического процесса.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Энергетический режим характеризуется ступенчатым изменением мощности по ходу плавки и обычно представляется в графическом виде. Каждому энергетическому режиму соответствует график с определенным числом ступеней мощности и их величиной. Такой график позволяет определить требуемый расход электроэнергии на плавку, который вводится в задающее устройство АСУ и является программой плавки. Энергетический режим технологического периода плавки устанавливается в соответствии с энергопотреблением технологического процесса.

Технологический период плавки состоит из ряда последовательных операций, характеризующихся различной длительностью, определенным физико-химическим состоянием металла и шлака, тепловым состоянием футеровки, т.е. в конечном счете разным энергопотреблением и соответствующими ступенями мощности.

При двухшлаковой технологии выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи (ДСП) технологический период плавки состоит из окислительного и восстановительного периодов.

Окислительный период. Этот период начинается после полного проплавления шихты, отбора пробы металла на полный химический анализ и скачивания шлака на 75 %.

Задачи окислительного периода:

- снижение содержания фосфора ниже допустимых пределов в готовой стали;
- возможно полное удаление растворенных в металле газов (азота, водорода);
- нагрев металла до температуры, превышающей на 120...130 К температуру ликвидус;
- приведение ванны в стандартное по окисленности состояние.

При этом температура жидкого металла в конце плавки должна быть не ниже заданной во избежание теплотехнически нецелесообразного подогрева металла в восстановительный период.

Необходимую величину ступени мощности электропечного трансформатора $S_{ок}$ для окислительного периода длительностью $t_{ок}$ находим из соответствующего баланса энергии ДСП заданной вместимости V с учетом компенсации тепловых потерь:

$$S_{ок} = \frac{0,001 (W_{у.ок.шл} + W_{у.под} + W_{у.хим}) m_o + P_{т.п.ок} \cdot \tau_{ок}}{\tau_{ок} \cdot \eta_{э} \cdot \lambda} \quad (2.38)$$

где $W_{у.ок.шл}$ — удельный расход энергии на нагрев и расплавление шлакообразующих и

шлакообразование;

$W_{у.под}$ — то же на перегрев металла;

$W_{у.хим}$ — то же на протекание химических реакций;

$\eta_{э}$ и λ — электрический КПД и коэффициент мощности, соответствующие

электрическому режиму окислительного периода;

$P_{т.п.ок}$ — мощность тепловых потерь в окислительный период.

Числитель этой дроби — затраты тепловой энергии в окислительный период плавки $W_{ок}$.

Удельный (на 1 т жидкой стали) расход энергии на нагрев и расплавление шлакообразующих и на шлакообразование равен:

$$W_{у.ок.шл} = 0,278 \cdot K_{ок.шл} \cdot \Delta H_{ок.шл} \quad \text{кВт} \cdot \text{ч/Мг}, \quad (2.39)$$

где $\Delta H_{ок.шл} \approx 2,1...2,7$ МДж/кг — изменение энтальпии шлака окислительного периода;

0,278 — коэффициент, кВт · ч/МДж;

$K_{ок.шл} \approx 20...40$ кг/Мг — расход шлакообразующих материалов (извести, плавикового

шпата и др.) для наведения шлака с целью удаления фосфора.
Удельный расход энергии на перегрев $\Delta T_{ок}$ равен:

$$W_{у.под} = 0,278 \cdot C_{ж} \cdot T_{ок} \text{ кВт} \cdot \text{ч/Мг}, \quad (2.40)$$

где $C_{ж}$ — средняя для данного интервала температур удельная теплоемкость жидкой стали, МДж/(Мг · К), определить которую можно по данным таблице 2.14.

Таблица 2.14 - Физические свойства некоторых сталей и сплавов

Марка стали	T_L , К	T_S , К	Λ , кДж/кг	C_o , Дж/(кг·К)	K , Дж/(кг·К ²)
12X18H10 Т	1713	1663	278	441	0,1835
9X18	1693	1553	278	498	0,1142
12X2H4A	1793	1693	266	484	0,1240
ШХ15	1733	1613	270	514	0,0900
P18	1713	1553	245	442	0,0850
60	1753	1613	270	470	0,1450

Примечание: Λ — удельная теплота фазового перехода;

$C = C_o + K (T - 273)$ — удельная теплоемкость.

Удельный расход энергии на протекание химических реакций равен:

$$W_{у.хим} = W_{у.энд} - W_{у.экз} \text{ кВт} \cdot \text{ч/Мг}, \quad (2.44)$$

где $W_{у.энд} \approx 40 \dots 60 \text{ кВт} \cdot \text{ч/Мг}$ — удельный расход энергии на эндотермические реакции в

случае применения твердого окислителя (руда, агломерат, окатыши);

$W_{у.экз}$ — удельное выделение энергии при экзотермических реакциях в случае использования в качестве окислителя газообразного кислорода, кВт · ч/Мг.

Значение $W_{у.экз}$ рассчитывают по тепловым эффектам реакций окисления элементов стали газообразным кислородом:

$$W_{y.экз} = 2,78 \sum (\Delta H_E \cdot \Delta E) \text{ кВт} \cdot \text{ч/Мг}, \quad (2.45)$$

где 2,78 — коэффициент, кг · кВт · ч/(МДж · % · Мг);

ΔE — количество окислившегося элемента, % (абс.);

ΔH_E — тепловой эффект реакции на 1 кг окисленного элемента, МДж:

Fe — 4,2...4,5;

Si — 24,5...26,5;

Cr — 10;

C — 12,5...15,3.

Согласно технологическим инструкциям в окислительный период для обеспечения дегазации жидкого металла необходимо окислить:

не менее 0,3 % C при выплавке углеродистых сталей, содержащих $\geq 0,6$ % C

и не менее 0,5 % C при выплавке средне- и низкоуглеродистых сталей.

Мощность тепловых потерь ДСП в окислительный период определяют по соотношению (при условии геометрического подобия):

$$P_{т.п.о} = K_{т.п.о} \cdot 0,19 \cdot m_o^{2/3} \text{ МВт}, \quad (2.46)$$

где $K_{т.п.о}$ — коэффициент, учитывающий возможное изменение тепловых потерь в окислительный период в случае применения на ДСП водоохлаждаемых элементов футеровки.

Время окислительного периода $\tau_{ок}$ складывается из этапов:

- наведения шлака окислительного периода (~ 5 мин);
- окисления углерода;
- выдержки (~ 10 мин) для приведения металла в стандартное по окисленности состояние (затухание «кипа»);
- скачивания шлака.

Время скачивания шлака при расчете энергетического режима не учитывается, так как в этот период трансформатор отключают.

Время окисления углерода можно определить, зная процент окисляемого углерода и скорость его окисления.

Таким образом, время окислительного периода равно:

$$\tau_{ок} = K_{ок} (0,2 + \% C/V_c), \quad (2.47)$$

где % C — абсолютный процент окисления углерода;

V_c — скорость обезуглероживания, %/ч;

0,2 — суммарное время наведения шлака и выдержки металла, ч;

$K_{ок}$ — коэффициент, учитывающий возможное изменение длительности окислительного периода благодаря сокращению времени наведения шлака, выдержки или увеличения скорости обезуглероживания.

Средняя скорость окисления углерода при продувке газообразным кислородом составляет 3...5 %/ч (0,05...0,08 %/мин.), а в случае использования твердого окислителя ~ 0,4%/ч (0,007 %/мин.).

Если $\Sigma W_{ок} > 0$, то $S_{ок} > 0$, т.е. в ДСП вводится необходимая электроэнергия на ступени мощности, равной $S_{ок}$.

При $\Sigma W_{ок} = 0$ $S_{ок} = 0$, т. е. трансформатор отключают от сети.

Если $\Sigma W_{ок} < 0$, то ДСП работает как теплогенератор (аналогично конвертеру) и $S_{ок} = 0$. Но для ДСП недопустим режим работы теплогенератора, так как весь избыток тепловой энергии реализуется в рабочем пространстве, вызывая чрезмерный перегрев жидкого металла, недопустимый перегрев футеровки, повышенные тепловые потери с отходящими газами, охлаждающей водой и т. д. Для устранения таких последствий при $\Sigma W_{ок} < 0$ в ДСП загружают предварительно прогретые охлаждающие добавки в виде железной руды или лома, который близок по химическому составу выплавляемой марке стали.

Необходимый расход охлаждающих добавок $K_{охл}$ определяют:

$$W_{охл} = 0,278 \cdot K_{охл} \cdot \Delta H_{охл}, \quad (2.48)$$

где $W_{охл}$ — удельный расход энергии на нагрев охлаждающих добавок;

$\Delta H_{охл}$ — изменение энтальпии охлаждающих добавок.

Входящие в уравнение (2.48) составляющие равны:

$$W_{охл} = -\Sigma W_{ок}/m_o \quad \text{кВт} \cdot \text{ч/Мг}; \quad (2.49)$$

$$\Delta H_{охл} = 0,001 [C'_T \cdot (T_s - T_o) + \Lambda + C'_{ж} \cdot \Delta T], \quad (2.50)$$

где C'_T и $C'_{ж}$ — средние для данного интервала температур удельные теплоемкости твердого и жидкого материала охлаждающих добавок соответственно, МДж/(Мг · К) (см. табл.);

Λ — удельная теплота фазового перехода. охлаждающих добавок, МДж/Мг (см. таблица 2.14);

T_s, T_o — температура солидус и исходная температура охлаждающих добавок соответственно, К.

Решая уравнения (2.48) и (2.49) относительно $K_{охл}$, получим

$$K_{охл} = -\Sigma W_{ок} / 2,78 \cdot 10^{-4} \cdot m_o [C_T' \cdot (T_s - T_o) + \Lambda + C_{ж}' \cdot \Delta T]. \quad (2.51)$$

После окончания продувки кислородом (присадки руды) отбирают пробу на химический анализ, измеряют температуру металла, после чего скачивают шлак и начинают восстановительный период.

Восстановительный период. Этот период начинают наведением шлака восстановительного периода из смеси извести, плавикового шпата и шамота в количестве $K_{в.шл} = 30...60$ кг/т.

Основные задачи восстановительного периода:

- 1) удаление серы;
- 2) раскисление металла;
- 3) корректировка химического состава металла (легирование);
- 4) регулирование температуры металла;
- 5) подготовка к выпуску высокоосновного жидкоподвижного шлака.

Технологические интервалы восстановительного периода различны по энергопотреблению, что делает необходимым иметь 3—4 ступени мощности.

Полная мощность электропечного трансформатора для наведения шлака восстановительного периода за время $\tau_{шл}$ должна быть равна:

$$S_{шл} = (2,78 \cdot 10^{-4} \cdot K_{в.шл} \cdot \Delta H_{в.шл} \cdot m_o / \tau_{шл} + P_{т.п.в}) / (\eta_{э} \cdot \lambda); \quad \text{МВ} \cdot \text{А}, \quad (2.52)$$

где $K_{в.шл}$ — расход шлакообразующих материалов для наведения шлака восстановительного периода, кг/Мг;

$\Delta H_{в.шл} \approx 2,1 \div 2,3$ МДж/кг — изменение энтальпии шлака восстановительного периода;

$P_{т.п.в}$ -мощность тепловых потерь ДСП в восстановительный период, МВт;

$\eta_{э}$ и λ — электрический КПД и коэффициент мощности, соответствующие электрическому режиму этого периода.

Время наведения шлака:

$$\tau_{\text{шл}} = K_{\text{шл}} \cdot 0,1 \text{ ч}, \quad (2.53)$$

где 0,1 — среднее время наведения шлака, ч;

$K_{\text{шл}}$ — коэффициент, учитывающий возможное изменение времени наведения шлака.

Мощность тепловых потерь ДСП в восстановительный период определяют из соотношения (при условии геометрического подобия):

$$P_{\text{т.п.в}} = K_{\text{т.п.в}} \cdot 0,14 \cdot m_o^{2/3} \text{ МВт}, \quad (2.54)$$

где $K_{\text{т.п.в}}$ — коэффициент, учитывающий возможное изменение тепловых потерь в восстановительный период в случае применения на ДСП водоохлаждаемых элементов футеровки.

Полная мощность печного трансформатора для раскисления и легирования металла за время $\tau_{\text{л}}$ должна быть равна:

$$S_{\text{л}} = (W_{\text{у.л}} \cdot m_o / \tau_{\text{л}} + P_{\text{т.п.в}}) / (\eta_{\text{э}} \cdot \lambda) = [m_o \cdot \sum_{k=1}^n (2,78 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta H_{\text{л}} \cdot m_{\text{у.л}})_k / \tau_{\text{л}} + P_{\text{т.п.в}}] / (\eta_{\text{э}} \cdot \lambda); \text{ МВ} \cdot \text{А}, \quad (2.55)$$

где $W_{\text{у.л}}$ — удельные энергозатраты на легирование и раскисление, МВт·ч/Мг;

$m_{\text{у.л}}$ — удельное количество легирующих материалов (ферросплавов) и раскислителей, кг/Мг;

$H_{\text{л}}$ — изменение энтальпии материалов и тепловой эффект растворения легирующих элементов, МДж/кг. Для ферросплавов марок ФС45, ФМн75, ФХ010—ФХ0501, ФСХ40 можно принять $\Delta H_{\text{л}} \approx 2,2 \dots 3,2$ МДж/кг; если процесс легирования и раскисления экзотермический, как, например, при использовании ферротитана и алюминия, то $\Delta H_{\text{л}} < 0$.

Время раскисления и легирования:

$$\tau_{\text{л}} = K_{\text{л}} \cdot 0,4 \text{ ч}, \quad (2.56)$$

где 0,4 — среднее время раскисления и легирования, ч;

$K_{\text{л}}$ — коэффициент, учитывающий возможные изменения времени раскисления и легирования.

Полная мощность электропечного трансформатора при выдержке (доводке) металла перед выпуском из ДСП в течение $\tau_{\text{выд}}$ необходима для компенсации тепловых потерь с целью сохранения заданной температуры металла конца окислительного периода и должна быть равна:

$$S_{\text{выд}} = P_{\text{т.п.в}} / (\eta_{\text{э}} \cdot \lambda) \text{ МВ} \cdot \text{А}. \quad (2.57)$$

Время выдержки:

$$\tau_{\text{выд}} = K_{\text{выд}} \cdot 0,1 \text{ ч}, \quad (2.58)$$

где 0,1 — среднее время выдержки, ч;

$K_{\text{выд}}$ — коэффициент, учитывающий возможные изменения времени выдержки.

В результате расчета параметров энергетического режима технологического периода плавки получают несколько значений мощности, необходимых для проведения плавки по заданной технологии. Объединив близкие по величине значения, получают 4—5 ступеней мощности. Соотношение $S_i / S_n = K_i$ (где S_n — номинальное значение полной мощности трансформатора) называют коэффициентом использования номинальной мощности.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Математическая модель расчета параметров для разработки и изучения графика энергетического режима технологического периода плавки на основе зависимостей (2.31-2.58) реализована на языке Паскаль в виде программы “ERT” (блок-схема алгоритма расчета представлена на рисунке 2.3).

Запуск программы из каталога в виде: ... \ERT\ERT.EXE

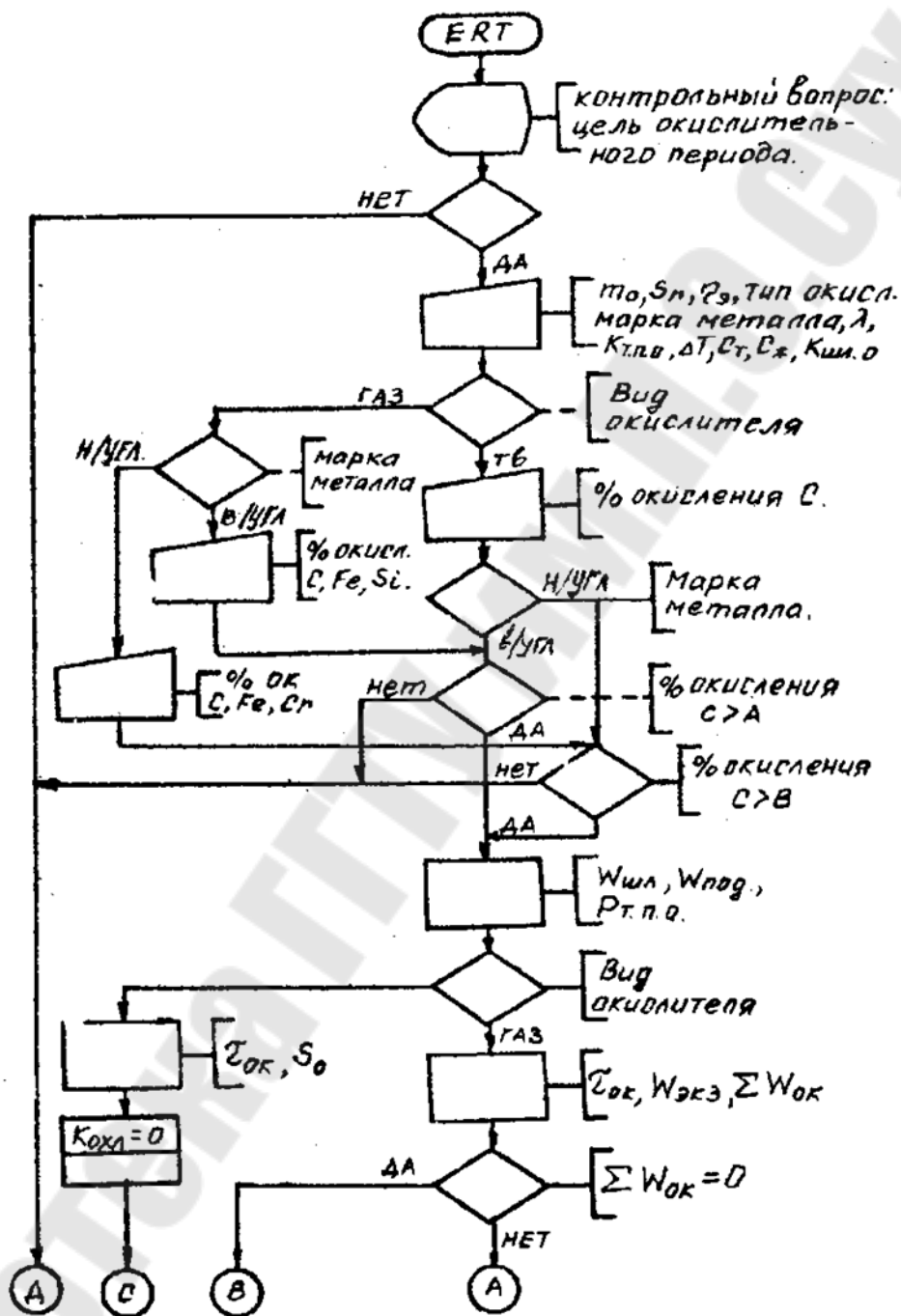


Рисунок 2.3(а) - Блок-схема алгоритма разработки энергетического режима технологического периода

Выход к программе – по команде: "F2"

Переход к следующей строке ввода информации или к очередному вопросу (при работе в «диалоговом режиме» с программой «ERT») происходит нажатием клавиши «TAB ⇌».

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И УКАЗАНИЯ ПО ОХРАНЕ ТРУДА

Для работы с программой «ERT» необходимо знать цели всех этапов технологического периода плавки, а также основы технологии двухшлакового метода выплавки стали в ДСП.

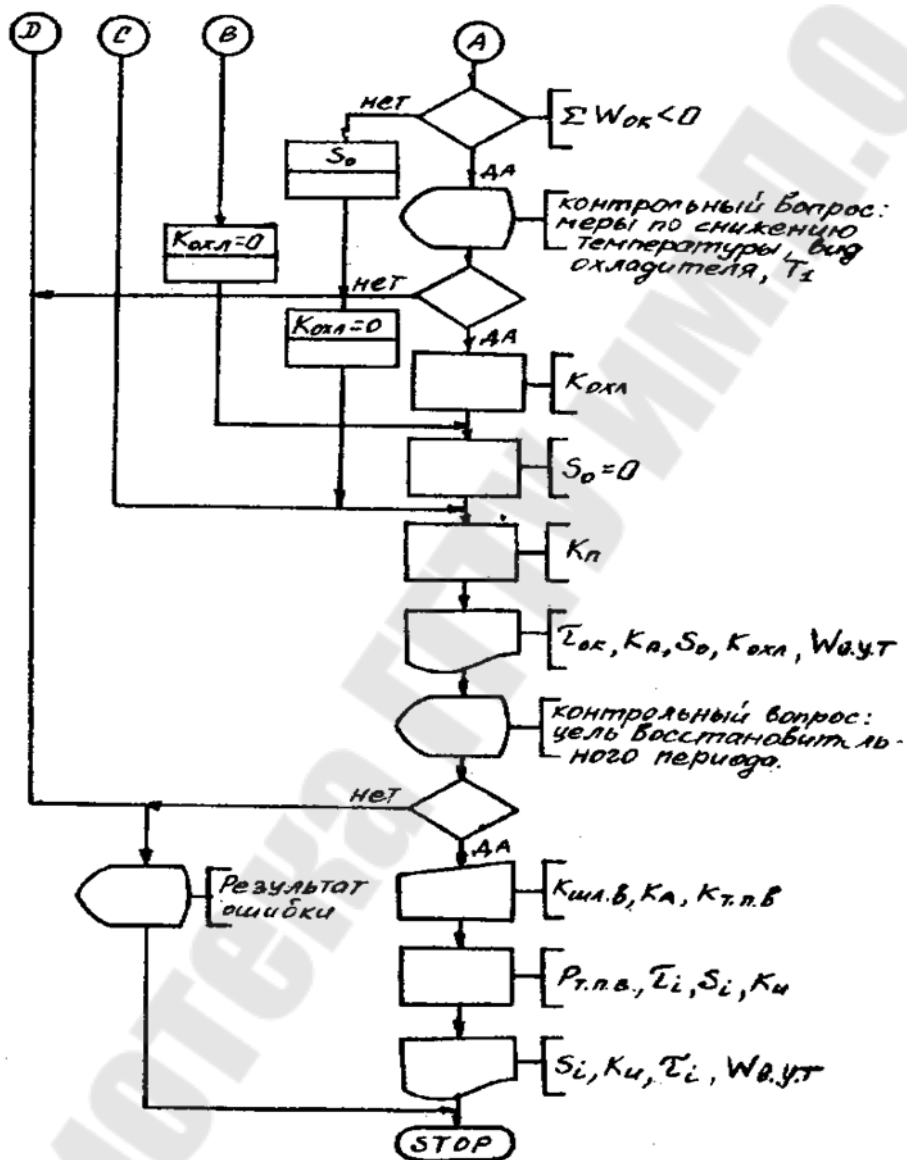


Рисунок 2.3(б) - Блок-схема алгоритма разработки энергетического режима технологического периода (продолжение)

При описании операций окислительного периода необходимо ответить на вопросы:

«Наведение шлака с целью: ...»

– правильный ответ из двух альтернативных обозначается клавишей «Пробел» знаком «+»;

«Введение окислителя с целью: ...»

– правильный ответ из двух альтернативных обозначается клавишей «Пробел» знаком «+»;

«Повышение температуры металла на: ...»

– правильный ответ из трех альтернативных обозначается клавишей «Пробел» знаком «+»;

Набор 4 правильных ответов со знаком «+» вводят в память ЭВМ клавишей «Enter».

Данные для разработки энергетического режима окислительного периода плавки вводят в следующем порядке:

Таблица 2.15 - Данные для разработки энергетического режима окислительного периода плавки

Наименование величины (параметра)	Обозначение	
	на экране	в тексте Пособия
Вместимость печи, Мг	Mo	m_o
Номинальная мощность трансформатора, МВ·А	Sh	S_H
Коэффициент мощности	Km	λ
Электрический КПД	КПДэ	$\etaэ$
Вид окислителя (выбор клавишами «↑» или «↓»)		
Марка металла (выбор клавишами «↑» или «↓»)		
Коэффициенты, учитывающие возможные изменения: тепловых потерь в окислит. период длительности окислит. периода	Кт.п.о Ko	К _{т.п.о} K _{ок}
Перегрев металла над температурой ликвидус	DT	ΔT
Средняя удельная теплоемкость металла, кДж/(кг·К) твердого жидкого	Ст Сж	С _т С _ж
Расход шлака в окислит. период, кг/Мг	Кшло	K _{ок.шл}

Ввод 12 параметров в память ЭВМ клавишей «Enter».

В зависимости от принятой технологии окислительного периода необходимо ответить на вопросы:

«Абсолютные проценты окисления элементов (углерода, хрома, железа или кремния), % %»;

«Ваши действия, если температура металла выше заданной»

(выбор из 4 альтернативных операций клавишами «↑» или «↓»);

«Тип охлаждающих добавок»

(выбор из 3 альтернативных типов клавишами «↑» или «↓»);

– определение начальной температуры охлаждающих добавок.

Ответы вводят в память ЭВМ клавишей «Enter».

Неправильные ответы штрафуются, о чем идет информация на экране и в протоколе. Одним из критериев оценки подготовки к работе с программой является количество штрафных очков, которое фиксируется в протоколе.

Результаты расчета выдаются на экран в виде таблицы (клавиша «F3»), в виде графика (клавиша «F4») и в виде протокола, пример которого представлен в приложении.

При описании операций восстановительного периода необходимо ответить на вопросы:

«Наведение шлака с целью: ...»

– правильный ответ из трех альтернативных обозначается клавишей «Пробел» знаком «+»;

«Присадка ферросплавов для: ...»

правильный ответ из трех альтернативных обозначается клавишей «Пробел» знаком «+»;

«Выдержка металла с целью: ...»

правильный ответ из двух альтернативных обозначается клавишей «Пробел» знаком «+»;

«Регулирование температуры по ходу плавки: ...»

– правильный ответ из трех альтернативных обозначается клавишей «Пробел» знаком «+»;

Набор 5 правильных ответов со знаком «+» вводят в память ЭВМ клавишей «Enter».

Данные для разработки энергетического режима восстановительного периода плавки вводят в следующем порядке (таблица 2.16):

Таблица 2.16 - Данные для разработки энергетического режима восстановительного периода плавки

Наименование величины (параметра)	Обозначение	
	на экране	в тексте Пособия
Расход шлака в восстановит. период, кг/Мг	Кшлв	К _{шл}
Расход ферросплавов, кг/Мг	Мл	<i>m_{у.л.}</i>
Коэффициенты, учитывающие возможные изменения: мощности тепловых потерь в восстановит. период, длительности наведения шлака, длительности раскисления и легирования, длительности выдержки	К _{т.п.в} Кшл Кл Кв	К _{т.п.о} К _{шл} К _л К _в

Ввод 6 параметров в память ЭВМ клавишей «Enter».

Выход из программы «ERT» двумя клавишами «Alt» и «X».

«Данные о себе» включают:

Фамилия, имя и отчество студента;

Имя файла результатов -

– в виде идентификатора без расширения, например: «АА». В каталоге ЭВМ имя файла указано в виде идентификатора с расширением «DAT», например: «АА.DAT», по которому идет поиск результатов в виде таблицы или графика.

Указания по охране труда. Ознакомиться с оборудованием вычислительной лаборатории, изучить правила техники безопасности при работе на ЭВМ. Необходимо иметь в виду, что при эксплуатации ЭВМ возможно поражение электрическим током. Поэтому все составные части ЭВМ должны быть надежно заземлены, закрыты защитными кожухами, оснащены световыми индикаторами режимов работы.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты расчета выведены в таблице:

Этап	Степень мощности трансформатора, МВ·А	Время, ч	Коэффициент использования номинальной мощности трансформатора

По полученным результатам ЭВМ строит зависимость

$$S = f_s(\tau),$$

которую необходимо дополнить зависимостью

$$P_d = f_p(\tau),$$

Для этого необходимо, сохраняя полученное графическое изображение, изменить масштаб оси ординат по соотношению

$$I_p = I_s \cdot \lambda \cdot \eta_3 \quad \text{МВт/см.}$$

где I_s – масштаб полной мощности, МВ·А/см;

λ – коэффициент мощности;

η_3 – электрический КПД.

Полученные зависимости $S = f_s(\tau)$ и $P_d = f_p(\tau)$ необходимо проанализировать и сопоставить с тепловоспринимающей способностью рабочего пространства ДСП, в частности, ступени мощности не должны превышать во избежание разрушения футеровки значение мощности на последней (N-ой) ступени энергетического режима энергетического периода плавки (см. лабораторную работу «ERD»).

Зависимость $S = f_s(\tau)$ позволяет оценить глубину регулирования мощности

$$\Gamma_S = S_H/S_{\min}$$

и соответствующую глубину регулирования вторичного напряжения электропечного трансформатора:

$$\Gamma_U = \sqrt{\Gamma_S} = U_{2л.в.} / U_{2л.н.}$$

Анализ графика энергетического режима технологического периода завершается определением расхода электроэнергии, забираемой ДСП на энергосистемы, на каждом этапе, за каждый период и в целом за плавку (с учетом результатов лабораторной работы «ERD»).

Полезно полученные результаты и выводы сопоставить с опытом эксплуатации ДСП в ЭСПЦ БМЗ.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Примеры контрольных вопросов, задаваемых при допуске к работе.

1. Что такое «энергетический режим» плавки и в каком виде задается?
2. Причина дискретного снижения мощности электропечного трансформатора по ходу технологического периода плавки в ДСП.
3. Что общего и в чем различие графиков энергетического режима энергетического и технологического периода плавки в ДСП. Какая их взаимная связь?
4. Почему при проведении окислительного периода плавки в ДСП возможно отключение электропечного трансформатора?
5. Роль и влияние охлаждающих добавок на формирование графика энергетического режима.

Примеры контрольных вопросов, задаваемых при защите к работе.

1. Причина дискретного снижения мощности электропечного трансформатора по ходу технологического периода плавки в ДСП.
2. Почему мощность, вводимая в ДСП в технологический период, не должна превышать мощность в конце энергетического периода?
3. Что такое коэффициент использования номинальной мощности ДСП и как оценить глубину регулирования мощности?
4. Как, зная график изменения полной мощности, определить расход электроэнергии на каждом этапе технологического периода и в целом за плавку?
5. Возможные меры снижения энергоемкости технологического периода плавки в ДСП.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №5 - РАЗРАБОТКА И ИЗУЧЕНИЕ ГРАФИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕЖИМА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПЕРИОДА ПЛАВКИ В ДУГОВОЙ ПЕЧИ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Закрепить материал лекции по курсу «Металлургические электропечи».

Изучить энергетику дуговой печи в энергетический период плавки.

Освоить методику разработки графика рационального энергетического режима работы дуговой печи.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

График энергетического режима работы дуговой печи (ДП) определяет изменение по ходу плавки количества электрической энергии, потребляемой ДП. Электропечной трансформатор обеспечивает дискретное (ступенчатое) изменение электрической мощности. Поэтому график энергетического режима ДП представляет собой совокупность ступеней электрической мощности, определяемых конкретно для данного периода плавки.

Методика разработки и построения графика энергетического режима ДП для энергетического периода плавки (периода расплавления твердой металлошихты), предложенная Н. В. Огороковым, основана на согласовании энергопотребления технологического процесса и тепловоспринимающей способности футеровки рабочего пространства ДП.

Для обеспечения условия теплового равновесия футеровки ($T_{\text{ф}} = \text{const}$) ее тепловоспринимающая способность должна быть согласована с излучательной способностью, выражаемой плотностью теплового потока $q_{\text{ф-ш}}$, излучаемого нагретой до рабочей температуры $T_{\text{ф}}$ футеровкой на нагреваемую металлошихту с переменной температурой (закон Стефана—Больцмана):

$$q_{\text{ф-ш}} = \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma_0 \cdot (T_{\text{ф}}^4 - T_{\text{ш}}^4), \quad (2.49)$$

где $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-14} \text{ МВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ — постоянная Стефана—Больцмана;

$\varepsilon_{пр} = [1/\varepsilon_{ш} + (1/\varepsilon_{ф} - 1) \cdot \chi_{ф-ш}]^{-1}$ — приведенная степень черноты для замкнутой системы двух поверхностей — футеровка «свободного» пространства ДП и металлошихта (рисунок 2.4);

$\varepsilon_{ш}$ и $\varepsilon_{ф}$ — степень черноты «серых» поверхностей металлошихты и футеровки соответственно (рисунок 2.5);

$\chi_{ф-ш} = S_{ш}/S_{ф}$ — угловой коэффициент, характеризующий долю лучистого потока с поверхности футеровки площадью $S_{ф}$, попадающего на поверхность металлошихты площадью $S_{ш}$.

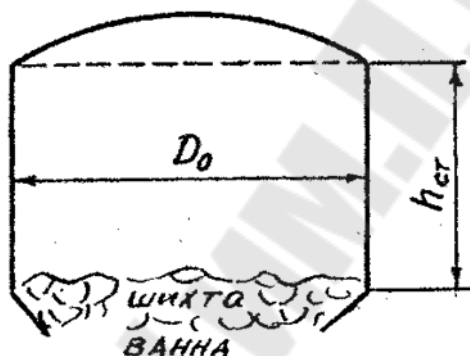


Рисунок 2.4 - Схема «свободного» пространства ДП

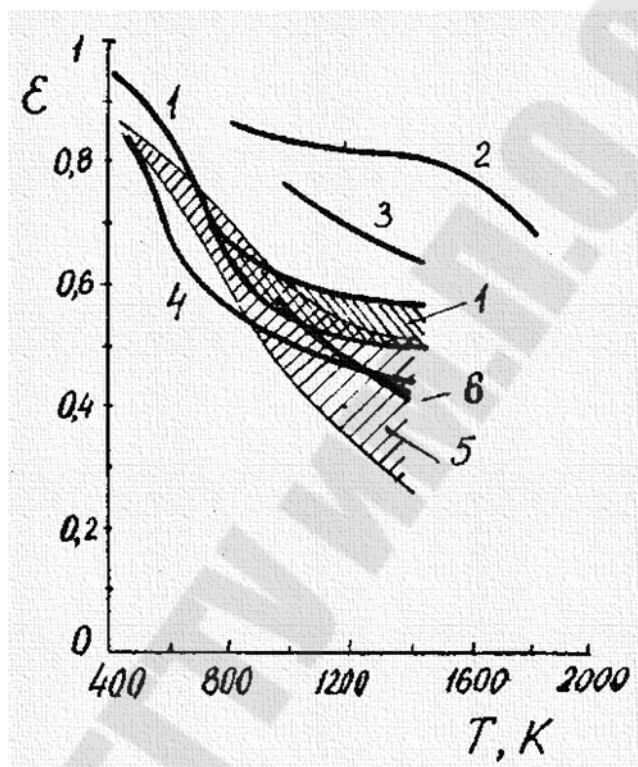
Угловой коэффициент $\chi_{ф-ш}$ для рабочего пространства, представленного, составляет:

$$\chi_{ф-ш} = \left(\frac{\pi}{4} D_0^2\right) / (\pi D_0 h_{ст} + \frac{\pi}{4} D_0^2) = 1 / (4K_{ст} + 1), \quad (2.50)$$

где $K_{ст} = h_{ст}/D_0$ — относительная высота стены ДП, определяемая при расчете теплотехнически рациональных геометрических размеров рабочего пространства ДП.

Поскольку график $q = f_q(T_{ф})$ (рисунок 2.5) характеризует при условии $T_{ф} = \text{const}$ также тепловоспринимающую способность футеровки рабочего пространства ДП, то во избежание разрушения футеровки полезную мощность $P_{пол}$, эквивалентную тепловому потоку $\Phi = q \cdot S_{т.о}$ и вводимую в ДП во время «открытого» горения дуг, необходимо изменять в соответствии с кривой q . Другими словами, график изменения полезной мощности $P_{пол} = f_p(\tau)$ должен быть согласован с кривой $q = f_q(T_{ш})$ в координатах « q — $T_{ш}$ ». При этом следует иметь в виду, что дискретное изменение полной мощности

электропечного трансформатора (путем переключения числа витков первичной обмотки высокого напряжения) вызывает необходимость построения ступенчатого графика изменения $P_{\text{пол}}$.



1 — периклазовый кирпич; 2 — хромитопериклазовый кирпич; 3 — дианасовый кирпич;
4 — корундовый кирпич; 5 — шамот-легковес; 6 — муллитокорундовый кирпич

Рисунок 2.5 - Изменение степени черноты при нагреве некоторых материалов

График строится, начиная с точки Л на оси абсцисс, которая соответствует температуре металла $T_{p.k}$ в конце энергетического периода, необходимой по технологии плавки для начала окислительного периода. Точка К соответствует значению $P_{\text{пол}}$ для данного момента плавки. Она расположена на пересечении перпендикуляра, восстановленного из точки Л, с кривой $q = f_q(T_{\text{ш}})$.

Каждой ступени мощности соответствуют на оси абсцисс точки u , $ж$, $д$... Точка б отражает дискретное изменение температуры шихты в начале периода, когда электрические дуги горят вблизи свода и

требуется профилактическое снижение мощности во избежание разрушения футеровки свода. Поэтому ординаты точек A и B меньше значения q примерно вдвое.

Точки Z, E, \dots определяют возможные значения полезной мощности $P_{\text{пол}}$ и соответствующие ступени ее изменения. Они расположены на пересечении кривой $q = f_q(T_{\text{ш}})$ с перпендикулярами, восстановленными из точек $u, ж, \dots$

Для диапазона изменения абсциссы от b до d , соответствующего этапу проплавления «колодцев» в слое металлошихты и «закрытого» горения дуг [1], тепловоспринимающая способность футеровки не лимитирует величину мощности, вводимой в рабочее пространство ДП. Поэтому ординаты точек B и G могут превышать соответствующие ординаты кривой $q = f_q(T_{\text{ш}})$ на данной стадии построения графика энергетического режима энергетического периода плавки. Положение точек B и G в какой-то мере произвольное, но для самого энергетического режима ступень мощности BG соответствует максимальному значению коэффициента использования номинальной мощности трансформатора ДП ($K_{\text{и.м.}}$). Такое соответствие может быть обеспечено методом последовательных приближений при формировании графика $AB\dots KL$.

Учитывая сложность расчета процесса плавления металлошихты разной насыпной плотности с различным способом укладки кусков при неодинаковом тепловом состоянии рабочего пространства ДП, в описываемой методике Н. В. Огорокова [1, 2] сделано допущение о линейном изменении во времени температуры нагреваемой металлошихты и жидкого металла от $T_{\text{ш.нач}}$ до $T_{\text{р.к}}$. Поэтому масштаб времени на оси абсцисс равен:

$$l_{\tau} = \tau_3 / \text{ОЛ} \quad (2.51)$$

Следует еще раз отметить, что максимальную мощность можно вводить в ДП только во время этапа «закрытого» горения дуг, т. е.

$$(b d \cdot l_{\tau}) < \tau_3,$$

где τ_3 — время этапа закрытого горения дуг, определяемое из соответствующего баланса энергии [2].

В координатах «мощность — время» площадь, ограниченная ломаной линией $AB\dots KL$, соответствует энергии W_p , излучаемой футеровкой за время τ_3 без учета тепловой энергии, теряемой из

рабочего пространства ДП для компенсации изменения энтальпии нагретой футеровки, остывающей за период подготовки ДП к плавке ($W_{1тп} = -\Delta H_{\phi}$), и тепловых потерь в энергетический период ($W_{2тп} = P_{2тп} \cdot \tau_3$) т. е. полезная энергия для расплавления шихты равна:

$$W_{пол.р} = W_p - (W_{1тп} + P_{2тп} \cdot \tau_3). \quad (2.52)$$

Среднее значение полезной мощности за период τ_3 равно:

$$P_{пол.ср} = W_{пол.р} / \tau_3. \quad (2.53)$$

Этому значению $P_{пол.ср}$ соответствует высота прямоугольника $ОМНЛ$, площадь которого равна площади ранее построенного многоугольника $ОАБ...КЛ$.

Это дает возможность определить масштаб оси ординат для активной мощности:

$$l_p = P_{пол.ср} / ОМ. \quad (2.54)$$

Искомый график изменения во времени тепловой мощности ДП или электрической активной мощности, вводимой в рабочее пространство ДП за время энергетического периода, строится с учетом тепловых потерь за период подготовки ДП к плавке ($P_{1тп.ср} = W_{1тп} / \tau_3$) и тепловых потерь в энергетический период ($P_{2тп}$). Для этого к ординатам графика $P_{пол} = f_p(\tau)$ в виде многоугольника $ОАБ...КЛ$ необходимо добавить отрезки $АА_1 = ББ_1 = ВВ_1 = \dots = ИИ_1 = КК_1 = (P_{1тп.ср} + P_{2тп}) / l_p$. Полученный многоугольник $ОА_1Б_1...К_1Л$ представляет собой график $P_d = f_p(\tau)$.

Отдельные значения $(P_d)_i$ можно определить с учетом масштаба мощности l_p :

$$P_d^I = ОА_1 \cdot l_p; P_d^{II} = бВ_1 \cdot l_p; P_d^{III} = дД_1 \cdot l_p; \\ P_d^{IV} = жЖ_1 \cdot l_p; P_d^V = иИ_1 \cdot l_p; P_{н.ср} = ОМ_1 \cdot l_p.$$

Длительность работы ДП на каждой ступени энергетического режима определяют с учетом масштаба времени l_τ :

$$\tau^I = Об \cdot l_\tau; \tau^{II} = бд \cdot l_\tau; \tau^{III} = дж \cdot l_\tau; \tau^{IV} = жи \cdot l_\tau; \tau^V = иЛ \cdot l_\tau.$$

Разделив масштаб l_p на электрический коэффициент полезного действия η_3 и коэффициент мощности λ , можно получить масштаб оси ординат для полной мощности

$$l_s = l_p / (\eta_3 \cdot \lambda). \quad (2.55)$$

С учетом (2.55) ломаная линия $OA_1B_1\dots K_1L$ представляет собой график изменения во времени полной мощности электропечного трансформатора, т. е. $S = f_S(\tau)$, а линия M_1H_1 — среднее значение полной мощности за период τ_3 . Отдельные значения ступеней полной мощности определяют:

$$\begin{aligned} S^I &= OA_1 \cdot l_s; S^{II} = \delta B_1 \cdot l_s; S^{III} = \partial D_1 \cdot l_s; \\ S^{IV} &= \text{ж} \text{Ж}_1 \cdot l_s; S^V = u I_1 \cdot l_s; S_{cp} = OM_1 \cdot l_s. \end{aligned}$$

График энергетического режима энергетического периода в виде $P_d = f_p(\tau)$ и $S = f_S(\tau)$, несмотря на ряд принятых допущений, соответствует двум основным условиям:

- за время τ_3 в ДП введена тепловая энергия W_p в соответствии с тепловым балансом;
- подводимая мощность P_d обеспечивает надежную тепловую работу футеровки.

Для оценки качества полученного графика энергетического режима используют следующие показатели;

- максимальный коэффициент использования номинального значения полной мощности S_n электропечного трансформатора — $k_{и.м} = S_{max}/S_n$, где S_{max} — максимальное значение полной мощности;

- средний (за период) коэффициент использования номинального значения полной мощности S_n электропечного трансформатора — $k_{и.ср} = S_{ср}/S_n$, где $S_{ср}$ — среднее значение полной мощности;

- длительность этапа «закрытого» горения дуг τ_3 (на рис. 3 — интервал $\delta—\partial$), составляющая обычно $\tau_3 = (0,5\dots 0,6) \tau_3$.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Описание задачи, приведенное в теоретическом введении, позволяет составить модель в виде системы конечных уравнений на основе закона Стефана—Больцмана, баланса энергии геометрически подобных ДП различной вместимости и соответствующей эквивалентной схемы замещения электропечной установки. На основе модели составлена программа «ERD».

Запуск программы из каталога в виде: ...:\ERD\ERD.EXE

Выход к программе – по команде «Shift-F3»

Файлу результатов будущего расчета присваивают имя-идентификатор с расширением “DAT”, например: “AA.DAT”

Переход к следующей строке ввода информации происходит нажатием клавиши «TAB ⇄».

При последующем вводе информации переход к нижней строке (или возврат к верхней строке) происходит нажатием соответствующих клавиш: «↑» или «↓»/ Данные для расчета вводятся в следующем порядке (таблица 2.17):

Таблица 2.17 – Данные для расчета энергетического режима.

Наименование величины (параметра) и обозначение на экране	Обозначение в тексте
1	2
Вместимость ДП, Мг	m_0
Мощность, МВ·А	S_H
Длительность периода, ч	τ_3
Рабочая температура огнеупорной футеровки, К	T_ϕ
Температура металла в конце периода, К	$T_{p.k}$
Начальная температура загружаемой металлошихты, К	$T_{ш}$
Приведенная степень черноты футеровки	$\epsilon_{пр}$
Энергетические и электротехнические данные	
Расходный коэффициент металлошихты, Мг/Мг Кр	k_p

Продолжение таблицы 2.17

1	2
Удельный полезный (теоретический) расход энергии на проведение энергетического периода, МВт·ч/Мг $W_{2ут}$	$W_{2у.т}$
Коэффициент, учитывающий присадку ферросплавов в другие периоды плавки и остаток жидкого металла от предыдущей плавки при донном сливе в ДП четвертого поколения $Kл$	$k_{л}$
Коэффициент, учитывающий дополнительный ввод тепловой энергии в ДП в энергетический период $Kд$	$k_{д}$
Коэффициент, учитывающий возможное изменение энергии тепловых потерь за подготовительный период по сравнению с геометрически подобной ДП с огнеупорной футеровкой $K1$	k_1
Коэффициент, учитывавший возможное изменение мощности тепловых потерь по сравнению с геометрически подобной ДП с огнеупорной футеровкой $K2$	k_2
Электрический коэффициент полезного действия $KПДэ$	$\eta_э$
Коэффициент мощности $Kм$	λ
Максимальное значение коэффициента использования номинального значения полной мощности электропечного трансформатора $Kим$	$k_{и.м}$
Среднее значение коэффициента использования номинального значения полной мощности электропечного трансформатора за энергетический период $Kи$	$k_{и.ср}$
Число ступеней	N

После ввода 18 величин курсор выводится на «ОК» и данные вводятся в память ЭВМ клавишей «Enter».

Расчет выполняется по команде клавишей «Shift+F4». Результаты расчета выводятся в следующем виде (таблица 2.18):

Таблица 2.18 – Результаты расчета

Обозначение		Наименование величины (параметра)	Единица измерения
на экране и в протоколе	в тексте		
Время	τ	Время работы на данной ступени энергетического режима	ч
Рпол	$P_{пол}$	Полезная мощность на заданной ступени энергетического режима	МВт
Рд	$P_{д}$	Мощность дуг (мощность нагрева) на данной ступени энергетического режима	МВт
S	S	Полная мощность электропечного трансформатора на данной ступени энергетического режима	МВ·А
W	W	Расход электроэнергии на данной ступени энергетического режима	МВт·ч
W2с	W2с	Суммарный расход электрической энергии с начала периода	МВт·ч

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И УКАЗАНИЯ ПО ОХРАНЕ ТРУДА

Для заданных N ступеней энергетического режима интервал изменения температуры по оси абсцисс на стадии открытого горения дуг определен в виде

$$\Delta T = 0,5 (TPK - TШ) / (N - 2),$$

поскольку этап «закрытого» горения дуг (ступень № 2) занимает половину длительности энергетического периода, из которого начальный этап (ступень № 1) зажигания дуг принят соответствующим повышению температуры шихты на 100 К.

Ординаты q_i ступеней ($N - 2$) разрабатываемого графика определены по формуле Стефана—Больцмана (1); для ступени № 1 —

$0,5 \cdot q_1$; для ступени № 2 — $KZAKR \cdot q_2$, где $KZAKR$ — коэффициент, изменяющийся от 1,0 с интервалом 0,01 для обеспечения заданного значения $k_{и.м}$.

Ограничения для разрабатываемого графика:

1 — число ступеней графика энергетического режима не должно быть меньше 4 и больше 8;

2 — длительность периода τ_3 должна быть согласована с балансом энергии за этот период [2]:

$$\tau_3 = \frac{W_{2у.т.} \cdot m_0 \cdot k_p \cdot k_d \cdot (1 - k_d) + k_1 \cdot 0,186 \cdot m_0^{0,67}}{S_H \cdot k_{и} \cdot \lambda \cdot \eta_3 - k_2 \cdot 0,14 \cdot m_0^{0,67}} ;$$

3 — расчетное значение $k_{и.м}$ не должно отличаться от максимально допустимого значения [1].

Программа «ERD» предназначена для получения и изучения данных, необходимых для разработки графика энергетического режима энергетического периода плавки в ДП заданной вместимости и мощности, в виде зависимостей:

$$P_{пол} = f_p(\tau); \quad P_d = f_p(\tau); \quad S = f_s(\tau); \quad W_{2c} = f_w(\tau).$$

Для удобства оформления графиков в программе предусмотрено вычисление масштабов для перехода:

на оси абсцисс — от температуры шихты к времени переключения ступеней мощности в виде ч/К;

на оси ординат — от плотности лучистого потока (по закону Стефана—Больцмана) к активной мощности в виде МВт/(МВт/м²) и полной мощности в виде МВ·А/(МВт/м²).

Указания по охране труда. Ознакомиться с оборудованием вычислительной лаборатории, изучить правила техники безопасности при работе на ЭВМ. Необходимо иметь в виду, что при эксплуатации ЭВМ возможно поражение электрическим током. Поэтому все составные части ЭВМ должны быть надежно заземлены, закрыты защитными кожухами, оснащены световыми индикаторами режимов работы.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ Контрольный пример

Для расчета энергетического режима энергетического периода плавки в ДП вместимостью 25 Мг имеем следующие вводные данные (Таблица 2.19):

Таблица 2.19 – Данные для ввода

Вместимость печи, Мг	25
Мощность, МВ·А	30
Длительность периода, ч	0,56
Рабочая температура огнеупорной футеровка, К	2050
Температура металла в конце периода, К	1825
Начальная температура загруженной шихты, К	300
Приведенная степень черноты футеровки	0,73
Энергетические и электротехнические данные	
Кр, Мг/Мг	1,07
W _{2ут} , МВт·ч/Мг	0,4
Кл	0,75
Кд	0,0001
К2	1,0
К1	1,0
КПДэ	0,95
Км	0,8
Ким	1,2
Ки	0,8
Число ступеней	5

Протокол расчета и пример построения графиков энергетического режима работы дуговой печи и изменения расхода электроэнергии в энергетический период плавки приведены в приложении.

Полезно полученные результаты и выводы сопоставить с опытом эксплуатации дуговых сталеплавильных печей ЭСПЦ БМЗ.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Примеры контрольных вопросов, задаваемых при допуске к работе.

1. Особенности теплообмена в рабочем пространстве ДП и характерные этапы в энергетический период.
2. Допущения, принятые при построении математической модели энергетического режима. Как определить масштаб оси абсцисс?
3. Как определить масштаб оси ординат для графика изменения мощности?
4. Причина дискретного снижения мощности ДП по ходу энергетического периода плавки.
5. Что такое угловой коэффициент излучения для рабочего пространства ДП?

Примеры контрольных вопросов, задаваемых при защите к работе.

1. Причина дискретного снижения мощности ДП по ходу энергетического периода.
2. Какая связь между графиками изменения мощности и расхода электроэнергии?
3. Почему для ДП переменного тока возможно иметь максимальный коэффициент использования номинального значения полной мощности электропечного трансформатора $k_{и.м} > 1$?
4. Возможное отличие графика энергетического режима в энергетический период для мощных и сверхмощных ДП третьего и четвертого поколения.
5. Какое влияние может оказать на изменение энергетического режима энергетического периода плавки в ДП предварительный подогрев металлошихты или применение жидкого чугуна (полупродукта)?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №6 - ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ (ЭПС)

Целью теплового расчета является определение параметров (энергетических, тепловых, геометрических), при которых обеспечивается проведение заданного технологического процесса. По результатам расчета определяют установленную мощность, проводят выбор материалов и толщины футеровки.

Для ЭПС непрерывного действия выбирает число тепловых зон и мощности каждой зоны. При подборе разработанной ранее конструкции электропечей для проведения требуемого режима термообработки, а также при смене номенклатуры обрабатываемых изделий проводят поверочный расчет, т.е. определяют возможность проведения заданного технологического режима с требуемой производительностью.

Исходные данные:

Наименование нагреваемого изделия	$\mathcal{Ж}$ – железо.
Масса изделия	$M = 255$ кг;
Длина электропечи	$L = 4$ м.
Начальная температура	$t_H = 25^\circ\text{C}$ (298 К)
Конечная температура	$t_K = 720^\circ\text{C}$ (993 К)
Тепловое излучение нагреваемого объекта	$\varepsilon_i = 0,7$
Поверхность обрабатываемого изделия	$F = axb = 2 \times 1 = 2$ м.
Время выдержки	$\tau_{\text{выд}} = 1800$ сек
Время охлаждения	$\tau_{\text{охл}} = 2520$ сек
Время загрузки и выгрузки	$\tau_{3,в} = 540$ сек

Определить:

1. Время цикла, нагрева и приведенный коэффициент излучения.
2. Потребляемое тепло и мощность печи.
3. Удельный расход электроэнергии и производительность печи.
4. Тепловой коэффициент полезного действия.

Решение:

1. Определяется продолжительность цикла термообработки и

производительность ЭПС, это является одним из основных показателей технологического режима электропечи.

В общем случае время цикла, сек

$$\tau_{ц} = \tau_{н} + \tau_{выд} + \tau_{охл} + \tau_{з,в} = 1244 + 1800 + 2520 + 540 = 6104 \text{ сек}$$

где $\tau_{н}$ - время нагрева;

$\tau_{выд}$ - время технологической выдержки;

$\tau_{охл}$ - время охлаждения;

$\tau_{з,в}$ - время процесса загрузки-выгрузки.

Время технологической выдержки при проведении теплового расчета ЭПС рассматривается как значение, заданное технологией процесса.

Время процесса загрузки-выгрузки определяют для ЭПС периодического действия либо по данным эксплуатации аналогичной конструкции, либо на основе таких соображений, как масса и геометрические размеры обрабатываемых изделий, тип ЭПС (камерная, шахтная, колпаковая и др.), способ загрузки, степени механизации загрузки и т.п.

1 Время нагрева теплотехнических тонких изделий (загрузок). В режиме постоянной температуры печи время нагрева определяют по формуле

$$\tau_{н} = cMv / C_{np}F_{л} = 670 \times 255 \times 0,016 / 3,99 \times 2 = 1244 \text{ сек.}$$

где c - удельная теплоемкость материала изделия, Дж/кгС⁰

M - масса изделия, кг;

$F_{л}$ - поверхность изделия (загрузки), воспринимающая тепловой поток, излучения, м²;

v - коэффициент нагрева излучением теплотехнических тонких изделий в режиме $t_{H} = const$.

2 Приведенный коэффициент излучения определяется по формуле

$$C_{np} = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$$

В нашем случае $F_1 \ll F_2$ поэтому $C_{np} = 5,7 \cdot \varepsilon_1 = 5,7 \cdot 0,7 = 3,99$,
где $\varepsilon_1 = 0,7$

где $C_0 = 5,7 \text{ Вт/ м}^2 \text{ К}^4$ - постоянная Стефана-Больцмана,
равная коэффициенту излучения абсолютно черного тела;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ - коэффициенты теплового излучения, соответственно,
нагреваемого объекта (изделия) и излучателя (рабочего пространства);

F_1, F_2 - поверхности, соответственно, изделия и рабочего
пространства

В инженерных расчетах ε можно принимать $\varepsilon_2 = 0,9, \varepsilon_1 = 0,3 \div 0,7$,
когда $F_1 \ll F_2$ принимает вид $C_{np} = 5,7 \cdot \varepsilon_1$

3 Значение коэффициента ν рассчитывают по формуле

$$\nu = \frac{T_H}{Q} \left[0,575 \lg \frac{\left(1 + \frac{T_H}{T_{II}}\right) \left(1 - \frac{T_H}{T_{II}}\right)}{\left(1 - \frac{T_K}{T_{II}}\right) \left(1 + \frac{T_K}{T_{II}}\right)} + 0,5 \operatorname{arctg} \frac{(T_K - T_H)/T_{II}}{1 + T_K \cdot T_H / T_{II}^2} \right]$$

Значение $\nu = 0,016$ при $t_H = \text{const}$

где T_n - температура печи, К;

T_n, T_k - температура изделия соответственно в начале и конце
процесса нагрева, К.

В том случае, если $t_H > 20^0 \text{ С}$ вначале определяют ν_1 для
фактического значения конечной температуры нагрева, затем
определяют ν_2 для конечной температуры, значение которой равно
фактической начальной температуре и разность $\nu_1 - \nu_2$ соответствует
значению ν для фактических условий.

При конвективном нагреве теплотехнические тонкие изделия в
режиме $t_H = \text{const}$ время нагрева определяется по формуле

$$\tau_H = \frac{cM}{\alpha_K F_K} \ln \frac{t_{II} - t_H}{t_{II} - t_K}$$

По п.1 можно решить определение температуры ЭПС, при которой обеспечивается нагрев изделия до требуемой температуры при заданной длительности нагрева.

Коэффициент конвективной теплоотдачи X_K определяется по зависимости от скорости циркулирующей атмосферы, ее теплофизических свойств, геометрических размеров и формы обрабатываемых изделий.

3 Потребляемую печью мощность можно определить по количеству тепла

$$Q_{ц} = Q_{пол} + Q_{всп} + \Sigma Q_{пот}$$

или по

$$P_{потр} = P_{пол} + P_{всп} + \Sigma P_{пот} = 3,492 + 6,363 + 0,174 = 10,029 \text{ кВт}$$

где $Q_{пол}$ или $P_{пол}$ - количество тепла или мощность, необходимая для нагрева обрабатываемых изделий (полезная), Вт;

$Q_{всп}$ или $P_{всп}$ - количество тепла или мощность, необходимая для нагрева вспомогательных приспособлений (корзин, конвейерных лент, поддонов и др.), Вт;

$\Sigma Q_{пот}$ или $\Sigma P_{пот}$ - суммарное количество тепла или мощности, необходимая для компенсации тепловых потерь, Вт.

4 Определение вспомогательной мощности

$$P_{всп} = \frac{C_{всп} \cdot M_{всп} (t_{Квсп} - t_{Нвсп})}{\tau_H} + C_{Г,всп} A_{Г,всп} (t_{II} - t_{Н,Г,всп}) = \frac{670 \cdot 17(720 - 25)}{1244} = 6,363 \text{ кВт}$$

В нашем случае $C_{Г,всп} A_{Г,всп} (t_{II} - t_{H,Г,всп}) = 0$ так как отсутствует вентиляция, по этой причине расход газа и др. значения не входят в формулу при определении значения $P_{всп}$

где $M_{всп}$ - масса вспомогательных приспособлений, кг;

$C_{всп}$ - удельная теплоемкость материала вспомогательных приспособлений, Дж/кг⁰С

$t_{K,всп}$, t_H , $t_{всп}$ - температура вспомогательных приспособлений соответственно в конце и начале нагрева, ⁰С;

t_{II} - температура печи;

$A_{Г,всп}$ - массовый расход специального газа, кг/С;

$C_{Г,всп}$ - удельная массовая теплоемкость специального газа, ⁰С;

$t_{HГ,всп}$ - начальная температура специального газа, ⁰С.

Тепловые потери через загрузочный и разгрузочный проемы, через различные отверстия в футеровке определяются составляющими теплообмена пенного пространства и окружающей среды – конвективной и излучения.

Составляющую теплообмена излучением $P_{потл}$ через открытые отверстия (проемы) рассчитывают так:

$$P_{пот,л} = 5,7 \epsilon_{отв} [(T_{II}/100)^4 - (T_{окр}/100)^4] - F_{отв} \phi,$$

где $\epsilon_{отв}$ - коэффициент теплового излучения отверстия (проема);

ϕ - коэффициент диафрагмирования, учитывающий глубину отверстия (проема) и экранирующее действие его стенок.

Принимают $\epsilon_{отв} = 0,8$ для крупных отверстий, размеры которых соизмеримы с размерами печного пространства, и $\epsilon_{отв} = 1,0$ для малых отверстий.

Конвективную составляющую определяют на основе экспериментальной формулы Доброхотова. Однако, эта формула была получена для печей с $t_H = 800 \div 900^{\circ}\text{C}$. С введением поправки на рабочую температуру печи при $t_{II} = 800^{\circ}\text{C}$ формула Доброхотова принимает вид:

$$P_{пот,к} = 320 F_{отв} h^{0,5} t_{II} / l_{отв}^{0,4}$$

$h, F_{отв}, l_{отв}$ - высота, площадь сечения отверстия и его глубина.

Если загрузочный (разгрузочный) проем или отверстия остаются открыты в течение всего, процесса термообработки, то мощность, необходимая для компенсации тепловых потерь через открытые отверстия.

$$P'_{ном,отв} = P_{ном,Н} + P_{ном,К}$$

В печах периодического действия загрузочные проемы открываются на короткое время $\tau_{откр}$. Для такого случая

$$P_{ном,отв} = (P_{ном,Н} + P_{ном,К}) \tau_{откр} / \tau'_{Н}$$

где $\tau_{откр}, \tau'_{Н}$ - продолжительность периодов открытого (разгрузочного) загрузочного проема и режима $q_{пол} = const$ (расчет $\tau'_{Н}$)

Мощность, необходимая для компенсации тепловых потерь печи (зоны), в общем случае будет:

$$P_{ном} = k_2 (P_{ф} + P'_{ном,отв} \tau_{откр} / \tau'_{Н})$$

В нашем случае при технологических процессах (в период работы)

дверь печи находится в закрытом состоянии до конца технологического цикла, по этой причине принимаем

$$P_{ном} = 0,05 P_{пол} = 0,05 \cdot 3,492 = 0,174 \text{ кВт},$$

где k_2 - коэффициент запаса на потери, не учтенные в расчете, например на увеличение потерь за счет старения и отклонений свойств футеровки от принятых в расчете, дополнительных потерь через неплотности в футеровке, футеровочные швы, тепловые короткие замыкания и т.д. (на практике принимают $k_2 = 1,2 \div 1,4$).

Тепловые потери через закрытые дверцы рассчитывают так же, как и тепловые потери через стенки.

5 Определение полезной мощности электропечей (зоны)

Полезная мощность определяется теплотой, которая воспринимается обрабатываемым изделием в процессе нагрева.

Определяется по формуле: (при $q_{пол} = const$)

$$P_{пол} = q_{пол} F = cM (t_K - t_H) / \tau_H = 670 \cdot 255 (720 - 25) / 1244 = 3,492 \text{ кВт}$$

где $q_{пол}$ - плотность теплового потока, $q_{пол}=const$;

F - поверхность обрабатываемого изделия, m^2 ;

C - удельная теплоемкость изделия, Дж/ кг °С;

M - масса изделия, кг;

t_K - конечная, °С;

t_H - начальная температура, °С;

τ_H - время нагрева, сек.

Определяется установленная мощность электропечи P_y , кВт по формуле:

$$P_y = k_1 \cdot P_{номр} = 1,3 \cdot 10,029 = 13,037 \text{ кВт},$$

где $P_{номр}$ - мощность потребляемая ЭПС при заданном режиме термообработки, Вт;

k_1 - коэффициент избытка мощности (коэффициент запаса), учитывающий постепенное увеличение, в результате окисления сопротивления нагревательных элементов.

Обычно $k_1 = 1,1 \div 1,2$ для ЭПС непрерывного действия

$k_{2_} = 1,2 \div 1,4$ для ЭПС периодического действия

6 Далее определяют удельный расход электроэнергии.

$$\mathcal{E} = P_{номр} / E = 10,029 / 0,0419 = 0,42 \text{ Дж/ кг},$$

где E - производительность ЭПС, кг/сек.

Определение производительности ЭПС периодического действия.

$$E = M/\tau_{ц} = 255/6084 = 0,0419 \text{ кг/сек},$$

где M - масса единовременной загрузка печи, кг; для ЭПС непрерывного действия

$$E=Lm/\tau_{ц}$$

Где m - масса загрузки на участке электропечи длиной 1 м, кг/м;

L - длина электропечи, м.

Тепловой коэффициент полезного действия ЭПС определяется

$$\eta_T = P_{пол}/P_{потр} = 3,492/10,029 = 34,8\%$$

Таблица 2.20 - Задания для теплового расчета электропечи сопротивления

Наименование данных	Задания												
	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Масса изделия M , кг	325	405	67	96	89	166	155	406	370	330	310	290	275
Длина электропечи, L , м	3,5	4,5	1,1	1,6	1,3	1,7	2,4	3,8	3,4	2,9	2,0	2,7	2,6
Начальная температура, t_H , °C	23	27	34	42	37	30	20	18	26	29	32	31	55
Конечная температура t_K , °C	900	1200	1010	1000	760	790	895	880	660	1010	1000	1200	1300
Тепловое излучение нагреваемого объекта, ε_l	0,55	0,6	0,6	0,4	0,5	0,6	0,27	0,35	0,45	0,44	0,5	0,66	0,29
Поверхность обрабатываемого изделия F , м ²	2,1	2,3	1,5	1,7	1,6	1,3	1,6	2,4	2,6	1,0	0,9	1,5	1,3
Время выдержки, $\tau_{\text{выд}}$, сек	$9 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$	$7,1 \cdot 10^4$	$11 \cdot 10^4$	$10 \cdot 10^4$	$21 \cdot 10^4$	$22 \cdot 10^4$	$15 \cdot 10^4$	$13 \cdot 10^4$	$9 \cdot 10^4$	$8,5 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^4$	$6,6 \cdot 10^4$
Время охлаждения, $\tau_{\text{охл}}$, сек	$1,2 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^3$	$1,9 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^3$	$3,6 \cdot 10^3$	$3,2 \cdot 10^3$	$1,9 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$
Время загрузки и выгрузки, $\tau_{з,в}$, сек	1200	1250	1300	1360	1450	1100	1350	1600	2000	1850	1770	1440	1140

Продолжение таблицы 2.20

Наименование данных	Задания											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Масса изделия M , кг	520	505	355	210	180	615	600	535	715	673	195	265
Длина электропечи, L , м	3,0	2,8	3,5	2,8	0,9	3,1	4,7	4,3	5,0	4,1	0,7	0,85
Начальная температура, t_H , °C	67	97	17	10	23	29	35	43	48	33	22	21
Конечная температура t_K , °C	1250	1115	1005	975	1300	1060	870	795	850	910	960	825
Тепловое излучение нагреваемого объекта, ε_l	0,23	0,32	0,43	0,54	0,64	0,51	0,32	0,29	0,3	0,5	0,22	0,57
Поверхность обрабатываемого изделия F , м ²	1,4	1,1	1,6	0,9	0,4	1,2	1,7	1,9	1,8	2,4	0,3	05
Время выдержки, $\tau_{выд}$, сек	$8 \cdot 10^4$	$6,6 \cdot 10^4$	$7,5 \cdot 10^4$	$10,5 \cdot 10^4$	$21 \cdot 10^4$	$23 \cdot 10^4$	$20 \cdot 10^4$	$16 \cdot 10^4$	$14 \cdot 10^4$	$11,5 \cdot 10^4$	$10 \cdot 10^4$	$24 \cdot 10^4$
Время охлаждения, $\tau_{охл}$, сек	$2,4 \cdot 10^3$	$2,7 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$	$2,7 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^3$	$2,7 \cdot 10^3$
Время загрузки и выгрузки, $\tau_{з.в}$, сек	1370	1630	1580	500	440	1100	1000	1240	1400	1300	630	690

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №7 - РАСЧЕТ И ВЫБОР НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕЧИ СОПРОТИВЛЕНИЯ.

Исходные данные:

$P_H = 17$ кВт $U_H = 380$ В $t_p = 800^\circ$ С

Размеры (внутренние) печи:

Ширина 0,8 м . Высота 0,6 м

Определить:

1. Основные электрические величины: $I_L, I_\phi, R_L, R_\phi, P_\phi$.
2. Параметры нагревательного элемента $d, W, L_\phi, R_\phi, W_\phi$.
3. Массу и способ укладки нагревательного элемента в печи.
Отношение ширины к толщине нагревательного элемента m

Решение:

1. Определение основных электрических величин;
а) определение линейных и фазных токов нагрузок по формулам:

$$I_L = P_H / U_H = 17 \cdot 10^3 / 380 = 44,8 \text{ А} \quad I_\phi = P_\phi / U_\phi = I_L / \sqrt{3} = 44,736 / \sqrt{3} = 25,858 \text{ А}$$
$$R_L = U_L^2 / P_H = 380^2 / 17 \cdot 10^3 = 8,494 \text{ Ом} \quad P_\phi = U_\phi^2 / R_\phi = 220^2 / 5,66 \cdot 10^3 = 8,55 \text{ Ом},$$

где $P_\phi = P_H / 3 = 17 / 3 = 5,66$ кВт

где P_H - номинальная мощность печи, кВт;

U_L - напряжение линейное, В;

U_ϕ - напряжение фазное, В.

- б) По [3] т.8-25 выбираем нагревательный элемент круглого сечения Х15Н6О-Н с $t_p = 950^\circ$ С;

с удельным сопротивлением $\rho_{20} = 1,12$ мкОм · м;

поправочный коэффициент электрического сопротивления $\alpha = 1,089$

при $t_p = 800^\circ$ С [3] т. 8-27.

2. Определение параметров нагревательных элементов.

2.1 Выбор формы (ленточный или проволочный) производится в зависимости от мощности печи по (3) т.8-29.

Диаметр круглого сечения (в виде спирали или зигзага)

$$d = \sqrt[3]{\frac{4P_\phi^3 \cdot \rho_{20p}}{\pi^2 \cdot U_\phi^2 \cdot W_\phi}}$$

где $\rho_{гор}$ - удельное электрическое сопротивление материала в горячем состоянии, Ом·м;
 W_0 - допустимая удельная поверхностная мощность нагревателя, Вт/м²
 P_ϕ - мощность на фазу, Вт.

$$\rho_{гор} = \rho_{20} \cdot \alpha = 1,12 \cdot 1,089 = 1,219 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

где α - поправочный коэффициент электрического сопротивления при 800°C $\alpha = 1,089$ [3] т. 8-27.

$\rho_{20} = 1,12$ мкОм·м (3) т. 8-25 для нихромного сплава Х15Н60-Н.

$$W_0 = \varepsilon_{np} \cdot W_s \cdot \alpha_{эф} = 0,333 \cdot 0,58 \cdot 0,68$$

где $\alpha_{эф} = 0,68$ (2) т. 45-4;
 $W_s = 0,58$ Вт/см².

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_H} + \frac{1}{\varepsilon_{Изд}} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{0,5} + \frac{1}{0,5} - 1} = 0,333$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 5,66^2 \cdot 10^6 \cdot 1,219 \cdot 10^{-6}}{3,14^2 \cdot 220^2 \cdot 0,131}} = 1,36 \text{ мм}$$

Выбираем по [3] стр.8-25 Х15Н60-Н $\alpha = 1,4$ мм стержень круглого сечения.

2.2 Определение длины нагревательного элемента.

$$L_\phi = \frac{R \pi d^2}{4 \rho_{гор}} = \frac{\pi \cdot U_{cp}^2 \cdot d^2}{4 P_\phi \cdot \rho_{гор}} = \frac{3,14 \cdot 220^2 \cdot 1,4 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 5,66 \cdot 10^3 \cdot 1,219 \cdot 10^{-3}} = 7,489 \text{ м}$$

где R – сопротивление нагревательного элемента.

2.3 Определение параметра нагревательного элемента в форе ленты или стержня прямоугольного сечения; размер сечения.

$$a = \sqrt{\frac{P_\phi^2 \cdot \rho_{гор}}{2m(m+1)U_\phi^2 \cdot W_0}}, \text{ м}$$

где $m = a/b$ – отношение ширины к толщине нагревательного элемента по (3) стр. 154

2.4 Длина ленты (или стержня) на фазоветвь.

$$L_{\phi} = \frac{RS}{\rho} = \frac{U_{cp}^2 ma^2}{P_{\phi} \rho_{\text{сop}}}, \text{ м}$$

2.5 Определение сопротивления нагревательного элемента.

$$R_{\phi} = \rho L_{\phi} / S = 1,719 \cdot 10^{-6} \cdot 7,489 / 1,53 \cdot 10^{-6} = 5,45 \text{ Ом}$$

где $S = F = \pi d^2 / 4 = 3,14 \cdot 1,4^2 / 4 = 1,539 \text{ мм}^2$

Метод укладки нагревательного элемента в камере зависит от конструктивных размеров проволочного спирального и ленточного зигзагообразного нагревателя.

Значение Д, А, S по [2] стр. 154 и размерности.

3. Определение удельной поверхностной мощности нагревательного элемента и теплоизоляционных материалов и их выбор.

а) Расчет удельной поверхностной мощности идеального нагревателя и нагреваемого изделия.

$$W_{\text{ид}} = \varepsilon_{np} W_s = 0,333 \cdot 5,8 = 1,93 \text{ Вт/см}^2; W_s = 5,3 \text{ Вт/см}^2$$

где ε_{np} - приведенный коэффициент теплового излучения.

W_s - удельная поверхностная мощность при теплообмене двух абсолютно черных тел.

б) Определение типа применяемых тепло-изоляционных материалов и их монтаж выполняется руководствуясь по [3] Г. 1-3, Г.2-1, 2-7.

в) Расчет сечения токоведущих токопроводов и пускорегулирующих устройств выполняется по [5, 6].

Таблица 2.21 - Задания для расчета и выбора нагревательных элементов печи сопротивления

Наименование данных	Задания												
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
Мощность печи, P_n, кВт	21,6	1,8	1,65	1,55	1,7	5,5	9,3	13,1	10,9	8,6	7,7	27,5	13,5
Напряжение питающей сети, U_n, В	220	380	220	380	220	380	380	660	380	660	380	660	380
Рабочая температура печи $T_{п}$, °С	450	150	560	620	750	920	1110	1200	700	900	850	1120	900
Размеры печи: Ширина, м	0,5	0,6	0,55	0,52	0,6	0,7	0,7	0,9	0,68	1,4	0,8	1,5	0,9
Высота, м	0,4	0,5	0,5	0,42	0,4	0,5	0,6	0,6	0,5	1,0	0,6	1,2	0,75
$m=a/b$	6	6	7	5	5	6	8	12	11	8	7	15	12
Наименование данных	Задания												
	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Мощность печи, P_n, кВт	5,7	9,6	12,7	10,7	8,1	7,3	3,9	3,5	46	3,6	18	4,5	53
Напряжение питающей сети, U_n, В	220	660	380	660	220	380	220	660	660	220	380	220	380
Рабочая температура печи $T_{п}$, °С	800	660	790	870	960	1000	690	1115	1120	500	700	660	1100
Размеры печи: Ширина, м	0,5	0,75	0,92	0,82	0,6	0,5	0,4	1,7	1,9	0,5	0,9	0,55	1,2
Высота, м	0,35	0,6	0,7	0,7	0,4	0,3	0,35	1,3	1,5	0,3	0,6	0,4	0,8
$m=a/b$	6	9	10	11	8	7	7	15	15	5	6	5	

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматизация металлургических печей [Учебник для студ. вузов, обуч. по спец. "Теплотехника и автоматизация металлург. печей] /под ред. О.М. Блинова Блинов О.М. – Москва: Металлургия, 1975. -376 с
Автоматическое управление электротермическими установками / Под. ред. А.Д. Свенчанского. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.
2. Альтгаузен А.П. Применение электронагрева и повышение его эффективности. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 128 с.
3. Аншин В.Ш., Крайз А.Г., Мейксон В.Г. Трансформаторы для промышленных электропечей. – М.: Энергоиздат, 1982. – 296 с.
4. Арутюнов В.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей: учебник для вузов / под науч. ред. В.А. Арутюнова: учебник для вузов Бухмиров В.В. – Москва: Металлургия, 1990. -238 с.
5. Болотов А.В., Шпель Г.А. Электротехнологические установки. – М.: Высшая школа, 1988. – 336 с.
6. Борисов Б.П., Вагин Г.Я. Электроснабжение электротехнологических установок. – М.: Киев: Наукова думка, 1985. – 248 с.
7. Великин Б.А. Торкретирование металлургических печей – Москва: Металлургия, 1972. -280 с.
8. Воителев В.В. Механическое оборудование печей: учеб. пособие для вузов / В.В. Воителев, Е.И. Могилевский: учеб. пособие для вузов Могилевский Е.И. – Москва: Металлургия, 1991. -148 с
9. Глинков Марк Алексеевич Общая теория печей: учеб. пособие для вузов / М.А. Глинков, Г.М. Глинков: учеб. пособие для вузов Глинков Герман Маркович – Москва: Металлургия, 1978. -264 с.
10. Глуханов Н.П., Федорова И.Г. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1983. – 160 с.
11. Головкин И.П. Улучшение коэффициента мощности преобразовательных подстанций повышенной частоты. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 80 с.
12. ГОСТ 2.105–95. Единая система конструкторской документации. Общие требования к текстовым документам. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 36 с.
13. ГОСТ 2.309–95. Единая система конструкторской документации. Обозначение шероховатости поверхностей. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 11 с.

14. ГОСТ 7.1–84. Библиографическое описание документа. Общие требования и правила составления. – Взамен ГОСТ 7.1–76; Введ. 01.01.86. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 78 с.
15. Данцис Я.Б. Методы электротехнических расчетов мощных электропечей. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 229 с.
16. Егоров А.В. Электроплавильные печи черной металлургии. Учебник для вузов - М.: Металлургия, 1985. с.с. 65-68.
17. Егоров А.В. Расчет мощности и параметров электроплавильных печей. Учебное пособие для вузов. М.: *МИСиС*, 2000, с.с. 19-21, 60-65, 88-90.
18. Кацевич Л.С. Теория теплопередачи и тепловые расчеты электрических печей: учебник для электромеханических техникумов: учебник для электромеханических техникумов – Москва: Энергия, 1977. -304 с.
19. Княжевская Г.С., Фирсова М.Г., Килькеев Р.Ш. Высококачественный нагрев диэлектрических материалов. – Л.: Машиностроение, 1989. – 64 с.
20. Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей / Под ред. Я.В. Данциса, Г.М. Жилова. – М.: Металлургия, 1986. – 208 с.
21. Лапшин И.В. Автоматизация дуговых печей – Москва: МГУ, 2004. -166 с.
22. Математическое моделирование и проектирование промышленных печей: учебное пособие / Ивановский энергетич. ин-т им. В.И. Ленина: учебное пособие – Иваново: Ивановский гос. ун-т, 1984. -89 с.
23. Минеев Р.В., Михеев А.П., Рыжнев Ю.Л. Графики нагрузок дуговых электропечей. – М.: Энергия, 1977. – 120 с.
24. Минеев Р.В., Михеев А.П., Рыжнев Ю.Л. Повышение эффективности электроснабжения печей. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.
25. Миронов Ю.М., Миронова А.Н. Электрооборудование и электроснабжение электротермических, плазменных и лучевых установок. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 376 с.
26. Повышение эффективности использования электроэнергии в системах электротехнологии / В.П. Борисов, Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов, А.К. Шидловский. – Киев: Наукова думка, 1990. – 237 с.
27. Пономаренко О.И. Расчет оптимального количества плавильных печей. // Литейное производство. – 1997. – N2. – С. 21–23. Пелих В.Ф.

28. Попкович В.Н. Оптимизация расчетов при определении теплового режима работы нагревательных печей // Известия ВУЗов. сер. Энергетика. – 2000. – №5. – С. 97–100. Каснерик Е.Н.
29. Проектирование электрометаллургических цехов / М.И. Гасик, В.А. Гладких, В.С. Игнатьева и др. – Киев: Донецк: Высшая школа, 1987. – 143 с.
30. Рапутов Б.М. Электрооборудование кранов металлургических предприятий. – М.: Металлургия, 1990. – 272 с.
31. Ровин Л.Е. Модернизация действующих плавильных печей // Литье и металлургия. – 2003. – № 3. – С.99–103. Ровин С.Л.
32. Ровин Л.Е. Системы очистки выбросов плавильных печей // Литье и металлургия. – 2002. – №4. – С. 109–111. Ровин С.Л.
33. Самохвалов Г.В. Электрические печи черной металлургии: учеб. пособие для вузов по спец. "Теплотехника и автоматизация металлург. печей": учеб. пособие для вузов по спец. "Теплотехника и автоматизация металлург. печей" Металлургические печи – Москва: Металлургия, 1984. -232 с.
34. Соيفер В.М. Огнеупоры для дуговых сталеплавильных печей малой емкости: справочник: справочник – Москва: Металлургия, 1994. -192 с.
35. Сооружение промышленных печей / под ред. канд. техн. наук И.А. Шишкова – Москва: Стройиздат, 1978. -413 с
36. Справочник по электропотреблению в промышленности / Г.П. Минин, Ю.В. Копытов. – М.: Энергия, 1978. – 495 с.
37. Тайц А.А. Электроснабжение металлургических заводов. – М.: Металлургия, 1967. – 288 с.
38. Теплотехнические расчеты металлургических печей: учеб. пособие для вузов / под ред. А.С. Телегина: учеб. пособие для вузов – Москва: Металлургия, 1982. -358 с.
39. Ус А.Г. Оптимизация электропотребления индукционных тигельных печей РУП ГЛЗ "Центролит" // Современные проблемы машиноведения: тез. докл. VI I Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П.О. Сухому), Гомель, 23–24 окт. 2008 г.. – 2008. – С. 154–155.
40. Установки индукционного нагрева / Под ред. А.Е. Слухоцкого. – Ленинград: Энергоиздат, 1981. – 325 с.
41. Фотиев М.М. Электрооборудование предприятий черной металлургии. – М.: Металлургия, 1980. – 312 с.
42. Фотиев М.М. Электроснабжение и электрооборудование металлургических цехов. – М.: Металлургия, 1979. – 255 с.

43. Фотиев М.М. Электропривод и электрооборудование металлургических заводов. – М.: Металлургия, 1990. – 352 с.
44. Чалых Б.Ф. Оборудование электродных заводов. – М.: Металлургия, 1990. – 257 с.
45. Шевцов М.С., Бородачев А.С. Развитие электротермической техники. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 360 с.
46. Электрификация металлургических предприятий Сибири / Под ред. В.И. Кудрина. – Томск: ТГУ, 1989. – 214 с.
47. Электрические печи сопротивления и дуговые печи / Под ред. М.Б. Гутмана. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 360 с.
48. Электрические промышленные печи. Дуговые печи и установки специального нагрева / Под. общ. ред. А.Д. Свенчанского. – М.: Энергоиздат, 1981. – 296 с.
49. Электрооборудование и автоматика электротермических установок / Под ред. А.П. Альтгаузена. – М.: Энергия, 1978. – 303 с.
50. Электроснабжение и автоматизация электротермических установок / А.Д. Свенчанский., З.П. Трейзон., Л.А. Мнухин. – М.: Энергия, 1980. – 320 с.
51. Электротермическое оборудование: Справочник / Под ред. А.П. Альтгаузена. – М.: Энергия, 1980. – 416 с.
52. Электротехнологические промышленные установки / Под ред. А.Д. Свенчанского. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 400 с.
53. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов; в 2 т. / Под ред. В.П. Смолянцева. – М.: Высшая школа, 1983. – 240 с.
54. Эффективное использование электроэнергии / Под ред. К. Смита. – М.: Энергоиздат, 1981. – 400 с.
55. Эффективные режимы работы электротехнологических установок / И.В. Жежеленко, В.М. Божко, Г.Я. Вагин, М.Л. Рабинович. – Киев: Техника, 1987. – 184 с.
56. Ярошенко Ю.Г. Тепловая работа и автоматизация печей: введение в специальность: учеб. пособие для вузов: введение в специальность: учеб. пособие для вузов – Москва: Металлургия, 1984. -207 с.

Жаранов Виталий Александрович

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ

Практикум

**по одноименному курсу для студентов
специальности 1-42 01 01 «Металлургическое
производство и материалобработка (по направлениям)»
специализации 1-42 01 01-01 «Металлургическое
производство и материалобработка (металлургия)
направления 1-42 01 01-01 02 «Электрометаллургия
черных и цветных металлов»
дневной и заочной форм обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 06.06.14.

Рег. № 21Е.

<http://www.gstu.by>