



Министерство образования Республики Беларусь

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

Кафедра «Машины и технология литейного производства»

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ЛИТЕЙНЫХ ЦЕХОВ

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к контрольным работам по одноименному курсу
для студентов специальности 1-36 02 01
«Машины и технология литейного производства»
дневной и заочной форм обучения**

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2007

УДК 669.04(075.8)
ББК 31.391я73
М54

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
механико-технологического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 2 от 20.12.2005 г.)*

Автор-составитель: *Л. Е. Ровин*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Обработка материалов давлением»
ГГТУ им. П. О. Сухого *Ю. Л. Бабарикин*

М54 **Металлургическое** оборудование литейных цехов : метод. указания к контрол.
работам по одноим. курсу для студентов специальности 1-36 02 01 «Машины и техноло-
гия литейного производства» днев. и заоч. форм обучения / авт.-сост. Л. Е. Ровин. –
Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2007. – 24 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://gstu.local/lib>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-420-599-1.

Изложены теоретические основы разделов «Теплопередача» и «Горение топлива», а также
примеры решения задач, наиболее часто встречающихся при расчетах нагревательных и пла-
вильных печей.

Для студентов специальности 1-36 02 01 «Машины и технология литейного производства»
дневной и заочной форм обучения.

УДК 669.04(075.8)
ББК 31.391я73

ISBN 978-985-420-599-1

© Ровин Л. Е., составление, 2007
© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2007

ПРЕДИСЛОВИЕ

Курс «Металлургическое оборудование литейных цехов» является одним из основных специальных курсов при подготовке инженеров-литейщиков. К металлургическому оборудованию относятся плавильные печи, установки для внепечной обработки сплавов, ковши, устройства для обслуживания печей: рекуператоры, установки подогрева шихты, удаления шлака, подачи дутья и очистки выбросов и т. п. Конструирование и эффективная эксплуатация оборудования предполагает знание основных принципов работы печей и других теплотехнических установок, таких как теплогенераторы и теплообменники, а также взаимосвязей между параметрами энергопотребления (расход электроэнергии, топлива, дутья и т. п.), металлургическими и технологическими характеристиками (производительность, КПД, температура металла и шлака, угар и др.) и конструктивными параметрами агрегатов.

Настоящие методические указания предназначены для содействия студентам, самостоятельно изучающим этот курс. В связи с этим в издание включены некоторые из базовых теоретических вопросов курса в кратком изложении и приведены примеры решения типовых задач. Кроме того, даны варианты контрольных заданий и рекомендуемый список литературы. Дополнительная информация по желанию студента может быть выдана в электронном виде кафедрой «Машины и технология литейного производства».

Задание выдается преподавателем индивидуально. Защита контрольной работы осуществляется после ее проверки и, в случае необходимости, доработки студентом по замечаниям преподавателя.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В данное издание по курсу «Металлургическое оборудование литейных цехов» включен ряд типовых задач и методика их решения, что позволяет студентам использовать полученные навыки для расчета и проектирования теплотехнических и металлургических установок. Так как тепловые расчеты предполагают достаточно большой объем вычислительной работы, при проведении практических заданий целесообразно часть вычислений производить во внеаудиторной обстановке в качестве самостоятельной работы студентов. При заочной форме обучения эти задачи являются основой контрольных работ по одноименному курсу.

Для ускорения и облегчения вычислительных работ студенты могут использовать ПЭВМ, в том числе в компьютерном классе кафедры. На кафедре «Машины и технология литейного производства» имеются специализированные пакеты программ для ЭВМ, а также дополнительная литература по металлургическому оборудованию литейных цехов.

При расчете печей основными этапами являются расчеты материального (для плавильных печей и сушил) и теплового (для печей всех типов) балансов, производительности и конструктивных параметров. Расчеты рекуператоров и других теплообменных аппаратов сводятся к определению коэффициентов теплопередачи от отходящих газов к воздуху, аэродинамического сопротивления и соответственно конструктивных (геометрических) параметров.

Во всех случаях необходимо уметь рассчитывать потери тепла и термический КПД. В данные методические указания включены перечисленные вопросы и даны примеры решения типовых задач.

2. РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА

Тепловой баланс печи составляется для определения расхода топлива в топливных печах, определения потребной мощности в электропечах, величины потерь, а также для анализа работы печи и определения ее технико-экономических показателей. Тепловой баланс основан на законе сохранения энергии.

При расчете теплового баланса необходимо предварительно изучить конструкцию и основные технические и технологические особенности агрегата. Целесообразно сделать эскиз рабочего пространства печи или схему агрегата, а затем по результатам расчета теплового баланса выполнить диаграмму потоков тепла.

Тепловой баланс печи состоит из ряда статей прихода и расхода тепла, которые необходимо рассчитать, чтобы определить требуемое количество топлива или электроэнергии. Для теплового баланса печи обязательно равенство прихода и расхода тепла, которое поступает в рабочее пространство и удаляется из него за единицу времени в непрерывно действующей печи или за всю операцию в печи периодического действия.

Для составления теплового баланса печи должны быть известны ее производительность, вид источника тепла, конструктивные особенности. На эскизе печи необходимо указать выбранную толщину футеровки, материалы для сооружения отдельных элементов печи,

размеры рабочих окон и отверстий; каналов для отвода дымовых газов и т. д.

От правильности учета всех возможных для данной конструкции печи статей прихода и расхода тепла зависит точность определения не только расхода топлива (электроэнергии), но и различных показателей тепловой работы печи: коэффициента полезного действия, удельного расхода топлива или электроэнергии, коэффициента использования тепла.

2.1. Тепловой баланс пламенной печи непрерывного действия

Приходная часть

1. Химическая теплота сгорания топлива, Вт:

$$W_{\text{ТХИМ}} = Q_{\text{Н}} B, \quad (2.1)$$

где $Q_{\text{Н}}$ – низшая теплота сгорания топлива, Дж/кг или Дж/м³; B – расход топлива, кг/с или м³/с.

2. Физическая теплота, вносимая подогретым воздухом, Вт:

$$W_{\text{в.физ}} = c_{\text{в}} t_{\text{в}} V_{\text{в}} B, \quad (2.2)$$

где $c_{\text{в}}$ – средняя удельная теплоемкость воздуха, Дж/(м³ · К) при $t_{\text{в}}$; $t_{\text{в}}$ – температура воздуха, °С; $V_{\text{в}}$ – количество воздуха, необходимое для горения топлива, м³/кг или м³/м³.

3. Физическая теплота, вносимая подогретым топливом, Вт:

$$W_{\text{ТФиз}} = c_{\text{Т}} t_{\text{Т}} B, \quad (2.3)$$

где $c_{\text{Т}}$ – средняя удельная теплоемкость топлива при $t_{\text{Т}}$, Дж/(м³ · К) или Дж/(кг · К); $t_{\text{Т}}$ – температура топлива, °С.

4. Химическая теплота окисления металла, Вт:

$$W_{\text{м.хим}} = \sum q_{\text{м}} m_{\text{м}}, \quad (2.4)$$

где \sum – знак, указывающий на необходимость учета всех окисленных элементов металла; $q_{\text{м}}$ – тепловой эффект окисления каждого элемента металла, кДж/кг; $m_{\text{м}}$ – количество каждого окисленного элемента металла, кг/с.

2.2. Расходная часть

1. Теплота, необходимая для нагрева и плавления металла (полезная теплота), Вт:

$$W_{\text{пол}} = [c_{\text{м}}(t_{\text{пл}} - t_{\text{н}}) + q_{\text{пл}} + c_{\text{ж}}(t_{\text{к}} - t_{\text{пл}})]m_{\text{м}}, \quad (2.5)$$

где $c_{\text{м}}$ – средняя удельная теплоемкость металла в интервале $t_{\text{пл}} - t_{\text{н}}$, Дж/(кг · К); $c_{\text{ж}}$ – средняя удельная теплоемкость жидкого металла, Дж/(кг · К); $t_{\text{к}}$, $t_{\text{н}}$ – средние по массе конечная и начальная температуры, °С; $t_{\text{пл}}$ – температура плавления металла, °С; $m_{\text{м}}$ – масса нагретого или расплавленного металла (производительность печи), кг/с; $q_{\text{пл}}$ – скрытая теплота плавления, Дж/кг.

2. Теплота, уносимая шлаками, Вт:

$$W_{\text{шл}} = c_{\text{шл}}(t_{\text{шл}} - t_{\text{н}})m_{\text{шл}}, \quad (2.6)$$

где $c_{\text{шл}}$ – удельная теплоемкость шлака при $t_{\text{шл}}$, Дж/(кг · К); $t_{\text{шл}}$ – температура шлака, °С; $m_{\text{шл}}$ – количество шлака, кг/с.

3. Теплота, затрачиваемая на разложение известняка ($\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$), Вт:

$$W_{\text{из}} = 1620 m_{\text{из}}, \quad (2.7)$$

где $m_{\text{из}}$ – количество разложенного известняка, кг/с.

4. Физическая теплота продуктов горения топлива, покидающих печь, Вт:

$$W_{\text{п.г.физ}} = c_{\text{п.г}} t_{\text{п.г}} V'_{\text{п.г}} B, \quad (2.8)$$

где $c_{\text{п.г}}$ – удельная теплоемкость продуктов горения при $t_{\text{п.г}}$, кДж/(м³ · К); $t_{\text{п.г}}$ – температура продуктов горения, °С; $V'_{\text{п.г}}$ – количество продуктов горения, образующихся при сжигании единицы топлива, м³/кг или м³/м³.

5. Химическая теплота продуктов горения топлива, Вт:

$$W_{\text{п.г.хим}} = (126 \text{ CO} + 108 \text{ H}_2) V'_{\text{п.г}} B, \quad (2.9)$$

где CO, H₂ – содержание оксида углерода и водорода в продуктах горения, %.

6. Потери теплоты теплопроводностью через кладку, Вт:

$$W_{\text{кл}} = kF_{\text{кл}}(t_{\text{печ}} - t_{\text{в}}), \quad (2.10)$$

где k – коэффициент теплопередачи от печного пространства в окружающий воздух через стенку, Вт/(м² · К); $F_{\text{кл}}$ – площадь поверхности кладки, м²; $t_{\text{в}}$ – температура окружающего воздуха, °С.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (2.11)$$

где α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи от рабочего пространства печи к стенкам футеровки и от стенок к окружающей среде, Вт/(м² · К), δ_1, δ_2 – толщина стенок футеровки печи, м; λ_1, λ_2 – коэффициент теплопроводности каждого слоя футеровки, Вт/(м · К).

7. Потери теплоты излучением через открытые окна и отверстия, Вт:

$$W_{\text{и}} = C_0 (T_{\text{печ}}/100)^4 F_{\text{ок}} \Phi \tau, \quad (2.12)$$

где $F_{\text{ок}}$ – площадь открытого окна, м²; Φ – коэффициент диафрагмирования, зависящий от толщины стен и конфигурации окна (табл. 2.1); τ – время, в течение которого открыто окно (при постоянно открытом окне $\tau = 1$).

Таблица 2.1

Коэффициент Φ диафрагмирования

Толщина стенки печи, мм	Размер окна печи, мм					
	ширина	Высота				
		150	250	450	600	750
115	150	0,56	0,63	0,66	0,68	0,69
	300	0,63	0,70	0,73	0,76	0,78
	600	0,68	0,76	0,80	0,82	0,84
	900	0,71	0,79	0,83	0,85	0,87
	1200	0,72	0,81	0,85	0,87	0,89
	1500	0,73	0,82	0,86	0,89	0,91
230	150	0,43	0,49	0,52	0,55	0,56
	300	0,49	0,56	0,60	0,63	0,64
	600	0,55	0,63	0,67	0,70	0,72
	900	0,57	0,66	0,70	0,73	0,75
	1200	0,59	0,68	0,72	0,76	0,78
	1500	0,61	0,69	0,74	0,77	0,79

8. Теплота, затрачиваемая на нагрев транспортирующих устройств, Вт:

$$W_{\text{тр}} = c_{\text{тр}}(t_{\text{тр}}^{\text{к}} - t_{\text{тр}}^{\text{н}})m_{\text{тр}}, \quad (2.13)$$

где $c_{\text{тр}}$ – средняя удельная теплоемкость транспортирующих устройств в интервале температур $t_{\text{тр}}^{\text{к}} - t_{\text{тр}}^{\text{н}}$, Дж/(кг · К); $t_{\text{тр}}^{\text{к}}$, $t_{\text{тр}}^{\text{н}}$ – конечная и начальная температуры транспортирующих устройств, проходящих через печное пространство в единицу времени, кг/с.

9. Потери теплоты с охлаждающей водой, Вт:

$$W_{\text{вод}} = c_{\text{вод}}(t_{\text{вод}}^{\text{к}} - t_{\text{вод}}^{\text{н}})m_{\text{вод}}, \quad (2.14)$$

где $c_{\text{вод}}$ – удельная теплоемкость воды в интервале температур $t_{\text{вод}}^{\text{к}} - t_{\text{вод}}^{\text{н}}$, кДж/(кг · К); $t_{\text{вод}}^{\text{к}}$, $t_{\text{вод}}^{\text{н}}$ – конечная и начальная температуры воды, °С; $m_{\text{вод}}$ – расход охлаждающей воды, кг/с.

10. Потери теплоты на нагрев контролируемой атмосферы, Вт:

$$W_{\text{а}} = c_{\text{а}}(t_{\text{печ}} - t_{\text{а}})V_{\text{а}}, \quad (2.15)$$

где $c_{\text{а}}$ – удельная теплоемкость контролируемой атмосферы в интервале температур $t_{\text{печ}} - t_{\text{а}}$, Дж/(м³ · К); $t_{\text{а}}$ – температура контролируемой атмосферы перед печью, °С; $V_{\text{а}}$ – расход контролируемой атмосферы, м³/с.

11. Неучтенные потери обычно принимают равными 10–15 % от суммы всех потерь теплоты, за исключением полезно затраченной:

$$W_{\text{неучт}} = 0,1 \div 0,2(W_{\text{расх}} - W_{\text{пол}}). \quad (2.16)$$

Приравнивая сумму статей прихода к сумме статей расхода, находим расход топлива, В:

$$W_{\text{хим}} + W_{\text{в.физ}} + W_{\text{т.физ}} + W_{\text{м.хим}} = W_{\text{пол}} + W_{\text{шл}} + W_{\text{из}} + \\ + W_{\text{г.физ}} + W_{\text{п.г.хим}} + W_{\text{кл}} + W_{\text{и}} + W_{\text{тр}} + W_{\text{вод}} + W_{\text{а}} + W_{\text{неучт}}. \quad (2.17)$$

Для электрической печи вместо теплоты, вносимой топливом и воздухом, учитывают теплоту, подаваемую из электросети, т. е. количество электроэнергии в единицу времени (мощность) и не учитывают расход теплоты с продуктами горения топлива.

2.3. Пример расчета теплового баланса печи

Определить расход топлива и составить тепловой баланс камерной печи непрерывного действия. Определить термический КПД печи $\eta = W_{\text{м}}/W_{\text{расх}}$. Печь отапливают природным газом; $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 35742$ кДж/м³;

производительность печи $m = 0,0278$ кг/с, 100 кг/ч. Детали из углеродистой стали нагревают до $t_M^K = 850$ °С, средняя удельная теплоемкость металла $c_M = 500$ Дж/(кг · К). Температура окружающего воздуха t_B и начальная температура металла t_M^H равны 20 °С. Температура печного пространства $t_{\text{печ}}$ и температура уходящих продуктов горения равны 900 °С. Размеры загрузочного окна $F_{\text{ок}} = 0,9 \times 0,25$ м², коэффициент Φ принимаем равным 0,58, окно постоянно открыто, поэтому $\tau = 1$.

Теплопередающая поверхность кладки печи $F = 18$ м². Коэффициент теплопередачи k принимаем равным 0,27 Вт/(м² · К). Количество воздуха, необходимого для сжигания 1 м³ газа, $V_{\text{в.пр}} = 9,91$ м³/м³; $c_B = 1300$ Дж/(м³ · К); $c_{\text{п.г}} = 1500$ Дж/(м³ · К). Количество продукта сгорания $V_{\text{п.г.пр}} = 10,91$ м³/м³.

1. Приходная часть теплового баланса:

$$W_{\text{хим}} = Q_H^p B = 35742 \cdot B \text{ кВт};$$

$$W_{\text{в.ф}} = c_B t_B V_{\text{в.пр}} B = 1300 \cdot 20 \cdot 9,91 \cdot B = 257660 \cdot B \text{ Вт.}$$

Теплотой, выделяющейся при окислении металла, пренебрегаем.

2. Расходная часть теплового баланса:

$$W_M = c_M (t_M^K - t_M^H) m = 500 (850 - 20) 0,0278 = 11537 \text{ Вт};$$

$$W_{\text{п.г}} = c_{\text{п.г}} t_{\text{п.г}} V'_{\text{п.г.пр}} B = 1500 \cdot 900 \cdot 10,91 \cdot B = 14728500 \cdot B \text{ Вт};$$

$$W_{\text{кл}} = kF(t_{\text{печ}} - t_B) = 0,27 \cdot 18 \cdot 880 = 4277 \text{ Вт};$$

$$\begin{aligned} W_{\text{изл}} &= C_0 [(900 + 273)/100]^4 F_{\text{ок}} \Phi \tau = \\ &= 5,7 [(900 + 273)/100]^4 0,9 \cdot 0,25 \cdot 0,58 \cdot 1 = 14082 \text{ Вт}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_{\text{неучт}} &= 0,2(W_{\text{п.г}} + W_{\text{кл}} + W_{\text{изл}}) = 0,2(14728500 \cdot B + 4277 + 14082) = \\ &= 2945700 \cdot B + 3672 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

3. Тепловой баланс.

Составляем уравнение теплового баланса:

$$\begin{aligned} 35742000 \cdot B + 257660 \cdot B &= 11537 + 14728500 \cdot B + \\ &+ 4277 + 14082 + 2945700 \cdot B + 3672; \end{aligned}$$

$$B = 0,00183 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Подставляем значение B в формулы статей баланса и полученные данные сводим в табл. 2.2.

Неувязка баланса составляет $100(65,912 - 65,880)/65,912 = 0,05 \%$, ею можно пренебречь.

Таблица 2.2

Тепловой баланс камерной печи

Приход			Расход		
Статьи прихода	кВт	%	Статьи расхода	кВт	%
1. Химическая теплота сгорания топлива	65,408	99,28	1. Нагрев металла	11,537	17,50
2. Физическая теплота воздуха	0,472	0,72	2. Теплота с уходящими продуктами горения	26,953	40,89
			3. Потери через кладку	4,277	6,49
			4. Излучение через окно	14,083	21,37
			5. Неучтенные потери	9,063	13,75
<i>Всего</i>	65,880	100	<i>Всего</i>	65,912	100

$$\text{ТКПД} = \frac{W_m \cdot 100}{\sum (W_{\text{пг}} W_{\text{кл}} W_{\text{изл}} W_{\text{н}} \dots)}, \%$$

Термический КПД печи равен (статья расхода № 1) – 17,5 %.

2.4. Расход энергии в электродуговой сталеплавильной печи ДСП

2.4.1. Энергетический период

Энергетический период – наиболее энергоемкий период плавки в ДСП, на который приходится до 75 % затрачиваемой электроэнергии. В энергетический период плавки полезный расход энергии $W_{\text{пол.р}}$ связан с изменением энтальпии при нагреве, плавлении и перегреве массы загруженной металлошихты $W_{\text{ш}} = \Delta H_{\text{ш}} M_{\text{ш}}$. Приход тепла состоит из суммы подводимой электроэнергии W_c , поступления тепла от нагретой футеровки $W_{\text{ф}}$, при использовании природного газа – тепла от сжигания топлива и тепла от экзотермических реакций $W_{\text{экз}} W_{\text{Г}}$. Расход энергии W_c включает $W_{\text{ш}}$, затраты на формирование шлака из шлакообразующих материалов $M_{\text{ш.м}}$, компенсацию энергозатрат эндотермических процессов $W_{\text{энд}}$ и потери тепла $W_{\text{пот}}$. Соответственно расход электроэнергии полный W_c и удельный $W_{\text{уд}}$ равны:

$$W_{\text{пол}} = W_{\text{ш}} + W_{\text{шл}} + W_{\text{энд}} + W_{\text{пот}}; \quad (2.18)$$

$$W_{\text{затр}} = W_{\text{пол}} + W_{\text{пот}}; \quad (2.19)$$

$$W_{\text{с}} = W_{\text{затр}} - W_{\text{г}} - W_{\text{экз}}; \quad (2.20)$$

$$W_{\text{уд}} = \frac{W_{\text{с}}}{M_{\text{ш}}}, \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}, \quad (2.21)$$

где $W_{2\text{ут}}$ – удельный теоретический расход энергии для проведения энергетического периода.

$$W_{2\text{ут}} = \Delta H_{\text{ш}} + (\Delta H_{\text{ж}} M_{\text{ж.р}} + W_{\text{шр}} + W_{\text{энд}} - W_{\text{г}} - W_{\text{экз}}) / M_{\text{ш}}. \quad (2.22)$$

Нагрев и плавление металлошихты различного состава сопровождается неопределенным изменением теплофизических свойств (вследствие повышения температуры и изменения химического состава металла), что осложняет определение энтальпии $\Delta H_{\text{ш}}$:

$$\Delta H_{\text{ш}} = Q_{\text{ф}} + \int_{T_{\text{н}}}^{T_{\text{с}}} C dT, \quad (2.23)$$

где C – средняя (для начального интервала температур) удельная теплоемкость твердого металла; $T_{\text{с}}$ – температура начала плавления (солидуса); $T_{\text{н}}$ – начальная температура металлошихты; $Q_{\text{ф}}$ – удельная теплота фазовых переходов при структурных переходах модификаций железа и при плавлении.

Средняя удельная теплоемкость C металлошихты различного химического состава составляет, кДж/кг · К: лом низкоуглеродистый 0,60; среднеуглеродистый 0,65 и высокоуглеродистый 0,70; отходы хромистые 0,50–0,60 и хромоникелевые 0,55–0,65.

Для сталей различного химического состава: $Q_{\text{ф}} = 240\text{--}285$ кДж/кг.

Начальная температура металлошихты $T_{\text{н}}$ определяется наличием и условиями предварительного подогрева: 1) без подогрева $T_{\text{н}} = 283$ К (среднегодовая температура); 2) с подогревом в обычных загрузочных бадах $T_{\text{н}} = 550\text{--}750$ К.

Температура начала плавления $T_{\text{с}}$ зависит от химического состава металлошихты:

$$T_{\text{с}} = T_{\text{пл}} - \sum \{ (\Delta T_{\text{с}})_i [E] \}, \quad (2.24)$$

где $[E]$ – содержание элемента в расплавляемой металлошихте, %; $(\Delta T_{\text{с}})_i$ – удельное (на 1 % содержания элемента) снижение температуры плавления чистого железа (1812 К).

Изменение удельной энтальпии при подогреве жидкого металла $\Delta H_{\text{ж}}$ зависит от удельной теплоемкости C :

$$\Delta H_{\text{ж}} = \int_{T_{\text{л}}}^{T_{\text{р}}} C dT \approx C(T_{\text{р}} - T_{\text{л}}), \quad (2.25)$$

где $T_{\text{л}}$ и $T_{\text{р}}$ – температура окончания плавления (ликвидуса) и температура жидкого металла в печи (переплав). Перегрев жидкого металла над температурой $T_{\text{л}}$, технологически необходимый для начала окислительного периода и который при различных вариантах технологии выплавки сталей может составлять 20–130 К; C – средняя (для данного интервала температур) удельная теплоемкость жидкой стали, составляющая в зависимости от химического состава (0,65–0,85) кДж/кг · К.

Температуру $T_{\text{л}}$ можно оценить в зависимости от химического состава расплавляемой металлошихты:

$$T_{\text{л}} = T_{\text{пл}} - \sum \{(\Delta T_{\text{л}})_i [E]\}, \quad (2.26)$$

где $(\Delta T_{\text{л}})_i$ – удельное (на 1 % содержания элемента) снижение температуры плавления чистого железа (1812 К).

Масса жидкого металла $M_{\text{ж}}$ в энергетический период плавки отличается от массы металлошихты $M_{\text{ш}}$ на величину угара U элементов металлошихты, зависящего от температуры, продолжительности нагрева до температуры $T_{\text{л}}$ без шлака и до $T_{\text{р}}$ под шлаком, состава печной атмосферы, расхода кислорода для подрезки металлошихты. При нагреве в атмосфере воздуха угар достигает 30–60 кг/т.

Удельные (на 1 т металлошихты) энергозатраты для подогрева жидкого металла $W_{\text{п}}/M_{\text{ш}}$ составят с учетом формулы (2.24) и суммарного угара элементов при расплавлении 1,85 %:

$$W_{\text{п}}/M_{\text{ш}} = 0,65(1830 - 1753)0,9815 = 45 \text{ МДж/ч.}$$

$$W_{\text{экз}} = 10M_{\text{ж.р}} \sum (\Delta H_{\text{Е}} \Delta [E]_{\text{р}}), \quad (2.27)$$

где $\Delta [E]$ – изменение содержания элемента в металлической фазе в данный период плавки, %; $\Delta H_{\text{Е}}$ – тепловой эффект соответствующей реакции, кДж/кг элемента.

Количество теплоты, выделяющееся при работе топливных горелок ТКГ, определяется по формуле

$$W_{\text{Г}} = Z \cdot Q \cdot V_{\text{Г}} \cdot \tau / M_{\text{м.з}}, \quad (2.28)$$

где Z – количество ТКГ; $V_{\text{Г}}$ – расход газа на одну горелку, м³/ч; τ – время работы горелки, ч.

В окислительный период плавки полезный расход энергии связан с изменением энтальпии жидкого металла массой $M_{ж.о}$ при подогреве до температуры, необходимой для выпуска плавки, $W_{п.о}$ шлакообразующих материалов массой $M_{м.о}$ для формирования шлака окислительного периода $W_{шл.о}$ за вычетом тепла экзотермических процессов окисления элементов жидкого металла в этот период $W_{экз}$:

$$W_{пол} = W_{о.у.т} \cdot \tau M_{ж.о} = W_{п.о} + W_{шл.о} - W_{экз}, \quad (2.29)$$

где $W_{о.у.т}$ – удельный теоретический расход энергии для проведения технологических операций окислительного периода.

$$W_{о.у.т} = \Delta H_{ж} + (W_{шл.о} - W_{экз})/M_{ж.о}. \quad (2.30)$$

Изменение удельной энтальпии жидкого металла $\Delta H_{ж}$ при подогреве от T_p до температуры окончания окислительного периода T_o составляет по аналогии с формулой (2.25):

$$\Delta H_{ж} = \int_{T_p}^{T_o} C_{ж} dT \approx C_{жс} (T_o - T_p) = C_{жс} \times \Delta T_o, \quad (2.31)$$

где ΔT_o – перегрев жидкого металла в окислительный период, составляющий при различных вариантах технологии выплавки 100–250 К.

В энергетике окислительного процесса большую роль играют экзотермические процессы окисления элементов жидкого металла при продувке газообразным кислородом:

$$W_{экз} = 10 M_{ж.о} \Sigma(\Delta H_E \Delta[E]_o), \quad (2.32)$$

где $\Delta[E]_o$ – изменение содержания элемента в металлической фазе в окислительный период плавки, определяемое по данным химического анализа, а для железа – по результатам материального баланса, %.

Отрицательное значение $W_{о.у.т}$ характеризует избыток тепловой энергии, выделяющейся в результате экзотермических реакций. Если эта величина достаточна для компенсации удельной энергии тепловых потерь, ДСП может в этот период работать без подвода электрической энергии как теплогенератор.

2.4.2. Потери тепла

ДСП теряет тепло теплопроводностью через футеровку, в виде конвективной теплоотдачи с теплоотдающей поверхности корпуса и свода W_o и в водоохлаждаемых элементах W_b , излучением через открытое рабочее окно, теплопроводностью через графитированные электроды W_e , на изменение энтальпии газов, проходящих через рабочее пространство W_r .

Потери тепла через футеровку пода рассчитываются по аналогии с (2.10). Футеровка пода (подины) обычно состоит из рабочей набивной части (магнетитовый порошок) и арматурной части из периклазового кирпича.

Тепловые потери теплопроводностью через футеровку ДСП рассчитывают по формуле

$$W_{\phi} = \frac{\Phi}{S} = \frac{(T_{\text{в}} - T_{\text{о}})}{\sum \left(\frac{\delta_i}{\lambda_i} \right) + \frac{1}{\alpha_{\Sigma}}}, \quad (2.33)$$

где $T_{\text{в}}$, $T_{\text{о}}$ – температура внутренней поверхности стенки и температура окружающей среды (теплоносителя) на значительном удалении от теплоотдающей поверхности, т. е. вне зоны процесса теплообмена; α_{Σ} – коэффициент теплоотдачи, учитывающий в общем виде конвективный и лучистый теплообмен поверхности с окружающей средой.

Значение коэффициента теплопроводности λ огнеупорных и теплоизоляционных материалов, применяемых для футеровки ДСП, выбирают по соответствующей температурной зависимости из таблиц [1].

Общие потери тепла равны сумме: $W_{\text{пот}} = \Sigma(W_{\phi}, W_{\text{в}}, W_{\text{изл}}, W_{\text{э}}, W_{\text{неуч}})$.

Тепловой баланс ДСП: $W_{\text{пот}} = W_{\text{пол}}$.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ

3.1. Порядок расчета

Для нагревательных электрических печей сопротивления при двухстороннем нагреве изделий принимается удельная производительность (напряжение активного пода) – $P_{\text{п}} = 500\text{--}700 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Площадь пода, занятая металлом, м^2 :

$$F_{\text{м}} = \frac{G}{P_{\text{п.ср}}}; \quad (3.1)$$

$$\left(G = \frac{n \cdot m}{\tau} \right). \quad (3.2)$$

Отливки обычно нагреваются на поддонах. Размеры поддона выбирают исходя из размеров отливки:

$$d_n \geq a; \quad b_n \geq b.$$

Задаем ширину рабочего пространства печи B_M : $B_M \geq b \times n$, где n – число поддонов по ширине печи. Отсюда длина L_M :

$$L_M = \frac{F_M}{B_M}. \quad (3.3)$$

Учитывая, что нагревательные элементы, расположенные на стенках печи, выступают внутрь стен рабочего пространства на 50–150 мм, а расстояние от нагревательных элементов до отливок (слитков) не должно быть меньше 100–250 мм соответственно, принимаем ширину B и длину L рабочего пространства печи, м.

При двухстороннем нагреве нагревательные элементы расположены также на своде и на поду. Рекомендуемые расстояния между нагревателями, стенками печи и нагреваемым металлом 0,35 м, а между поддоном и подом 0,15 м.

Принимаем высоту садки H_M . При однослойной загрузке: $H_M = c$. С учетом принятых величин и высоты H_c определяем общую высоту рабочего пространства печи H .

Принимаем за теплоотдающую поверхность печи внутреннюю поверхность ее футеровки и, считая газовую среду лучепрозрачной, находим приведенный коэффициент излучения $C_{пр}$ Вт/(м² · К⁴) по формуле

$$C_{пр} = \frac{5,7}{\frac{1}{\varepsilon_M} + \left(\frac{1}{\varepsilon_{II}} - 1 \right) \cdot \frac{F_M}{F_{II}}}, \quad (3.4)$$

где F_M – тепловоспринимающая поверхность нагреваемого металла, м². При двухстороннем нагреве F_M удваивается; F_{II} – теплоотдающая поверхность печи, м; ε_M , ε_{II} – соответственно степень черноты поверхностей металла и футеровки печи (по справочным данным [3]).

Далее определяем средний коэффициент теплоотдачи излучением, α , Вт/(м² · К):

$$\alpha_{изл} = \frac{C_{пр} \cdot \sqrt{\left[\left(\frac{T_{II}}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_M^H}{100} \right)^4 \right] \cdot \left[\left(\frac{T_{II}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_M^K}{100} \right)^4 \right]}}{\sqrt{(T_{II} - T_M^H) \cdot (T_{II} - T_M^K)}}, \quad (3.5)$$

где $T_{\text{п}}$, $T_{\text{м}}^{\text{н}}$ и $T_{\text{м}}^{\text{к}}$ – температуры в рабочем пространстве печи, начальная и конечная отливок (заготовок), К.

В расчетах по формуле (3.5) ориентировочно принимаем температуру газов в рабочем пространстве печи, °С:

$$t_{\text{п}} = t_{\text{м}}^{\text{к}} + (50 - 70). \quad (3.6)$$

Для печей сопротивления без принудительной циркуляции газов можно принять коэффициент теплоотдачи конвекцией $\alpha^{\text{к}} \approx 8-10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Тогда находим суммарный коэффициент теплоотдачи к металлу:

$$\alpha = \alpha^{\text{изл}} + \alpha^{\text{конв}}. \quad (3.7)$$

Находим критерий Био:

$$\text{Bi} = \frac{\alpha \cdot S}{\lambda}, \quad (3.8)$$

где $S - 1/2$ толщины стенки отливки, м.

Если $\text{Bi} > 0,5$, считаем, что температурное поле в отливке будет неравномерным (тело термически массивное). При $\text{Bi} < 0,25$ – тело термически тонкое, а поле – равномерное. При $0,25 < \text{Bi} < 0,5$ – можно использовать любой из вариантов расчета.

Температурный критерий для поверхности отливки:

$$\Theta_{\text{п}} = \frac{(t_{\text{п}} - t_{\text{м}}^{\text{к}})}{(t_{\text{п}} - t_{\text{м}}^{\text{н}})}. \quad (3.9)$$

По найденным значениям Bi , $\Theta_{\text{п}}$ и номограмме $\Theta = f(F_0)$ [1] находим критерий Фурье:

$$\text{Fo} = \frac{a \cdot \tau}{S^2}. \quad (3.10)$$

Коэффициент температуропроводности a , входящий в критерий Фурье, $\text{м}^2/\text{с}$:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}. \quad (3.11)$$

Если задано время τ , то, соответственно при найденных значениях Bi и Fo по номограмме [1] находим температурный критерий для центра отливок $\Theta_{\text{ц}}$, а затем определяем $t_{\text{ц}}^{\text{к}}$, принимая $t_{\text{ц}}^{\text{н}} = t_{\text{м}}^{\text{н}}$:

$$t_{\text{ц}}^{\text{к}} = t_{\text{п}} - \Theta_{\text{ц}}(t_{\text{п}} - t_{\text{ц}}^{\text{н}}). \quad (3.12)$$

Сравним полученные значения и определим перепад температур $\Delta t = t_M^K - t_{\text{цент}}^K$. Величина Δt не должна превышать значения, указанного в задании. В противном случае необходимо изменить скорость нагрева $\left(\frac{\Delta t}{\tau}\right)$, например, за счет изменения температуры в печи $t_{\text{п}}$ и повторить расчет.

Поскольку при температурах печи до 1200–1400 °С рекомендуется использовать двухслойную футеровку, назначаем материал для огнеупорной кладки и тепловой изоляции. Это может быть, например, шамот А толщиной 115 мм и диатомитовый кирпич толщиной 300 мм, асбест толщиной 3–6 мм. Возможны и другие варианты футеровки. С учетом расположения и габаритов нагревательных элементов и выбранного варианта футеровки рассчитываем толщину стенки, свода и пода печи и определяем внешние габариты печей.

Для уточнения варианта футеровки рассчитывается (по заданию) тепловой поток через стенки печи и определяется $t_{\text{вн}}$. Если расчетное значение $t_{\text{вн}}$ получается выше заданного, то подбирается другой вариант футеровки и расчет повторяется.

3.2. Расчет времени разогрева футеровки

При периодической работе печей, подготовке ковшей для заливки металла, сушке футеровки или литейных форм необходимо определить длительность процесса разогрева футеровки или материала литейной формы. Вследствие симметричности процессов теплообмена аналогичным образом рассчитывается и длительность обратного процесса.

Процесс нагрева (охлаждения) в общем случае рассчитывается по дифференциальному уравнению теплопроводности Фурье, причем в данном случае используется одномерная схема:

$$\frac{dt}{d\tau} = a \frac{d^2t}{dx^2}. \quad (3.13)$$

3.2.1. Порядок расчета

Учитывая, что огнеупорные материалы имеют низкую теплопроводность λ , как правило, футеровка относится к термическим массивным телам и ее нагрев происходит при граничных условиях I рода.

В этом случае порядок расчета до времени разогрева до данной температуры следующий:

1. Определяют ориентировочные значения λ материала каждого из слоев футеровки, учитывая их толщину при условии и стационарного равномерного температурного поля. Для четырех слоев значения температур на границе слоев t_{n+1} :

$$t_{1-2} = t_0 + (t_{\text{вн}} - t_0) \cdot (\delta_2 + \delta_3 + \delta_4) / (\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4); \quad (3.14)$$

$$t_{2-3} = t_0 + (t_{\text{вн}} - t_0) \cdot (\delta_3 + \delta_4) / (\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4) \text{ и т. д.,}$$

где t_{1-2} – температура на границе 1 и 2 слоя, °С; t_0 , $t_{\text{вн}}$ – температуры окружающей среды и внутренней поверхности футеровки, °С; δ_1 , δ_2 , δ_3 , δ_4 – толщина слоев футеровки, м.

Затем рассчитывают средние температуры слоев: $t_{\text{ср.1}}$, $t_{\text{ср.2}}$ и т. д.

По справочным таблицам [1] находят формулы расчета λ при $t_{\text{ср}}$.

В случае необходимости уточнить значение λ можно путем расчета теплового потока q :

$$q = \frac{t_{\text{вн}} - t_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{1}{\alpha}},$$

по полученным значениям λ и значению коэффициента конвективного теплообмена α , рассчитываемому по принятой температуре наружной стенки печи (ковша), обычно ~ 100 °С. Уточненный расчет выполняется методом последовательных приближений до тех пор, пока расхождение не будет превышать допустимой погрешности, обычно, не более 10 %.

$$t_{1-2} = t_{\text{вн}} - q \cdot \frac{\delta_1}{\lambda_1}, \quad (3.15)$$

$$t_{2-3} = t_{\text{вн}} - q \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right) \text{ и т. д.}$$

2. Определяем значение Bi :

$$Bi = \frac{\alpha_{\text{п}} \cdot l}{\lambda}, \quad (3.16)$$

где $\alpha_{\text{п}}$ – суммарный коэффициент теплопередачи от внутреннего пространства печи к поверхности футеровки. Суммарный коэффициент $\alpha_{\text{п}}$ задается или рассчитывается как сумма коэффициентов передачи

тепла конвекцией и излучением; l – приведенная толщина футеровки, м; λ – приведенный коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К).

Полученное значение Bi сравнивается с критическим. Если $Bi > 0,5$, то тело считается термически массивным.

3. При нагреве термически массивных тел расчет нагрева производят при граничных условиях I рода.

Тогда решение уравнения (3.25) получается в виде:

$$\Theta = f\left(F_0, \frac{\delta_i}{\sum \delta_i}\right), \quad (3.17)$$

где $\Theta = \frac{(t_{вн} - t)}{(t_{вн} - t_0)}$ – относительная температура футеровки в рассматриваемом слое.

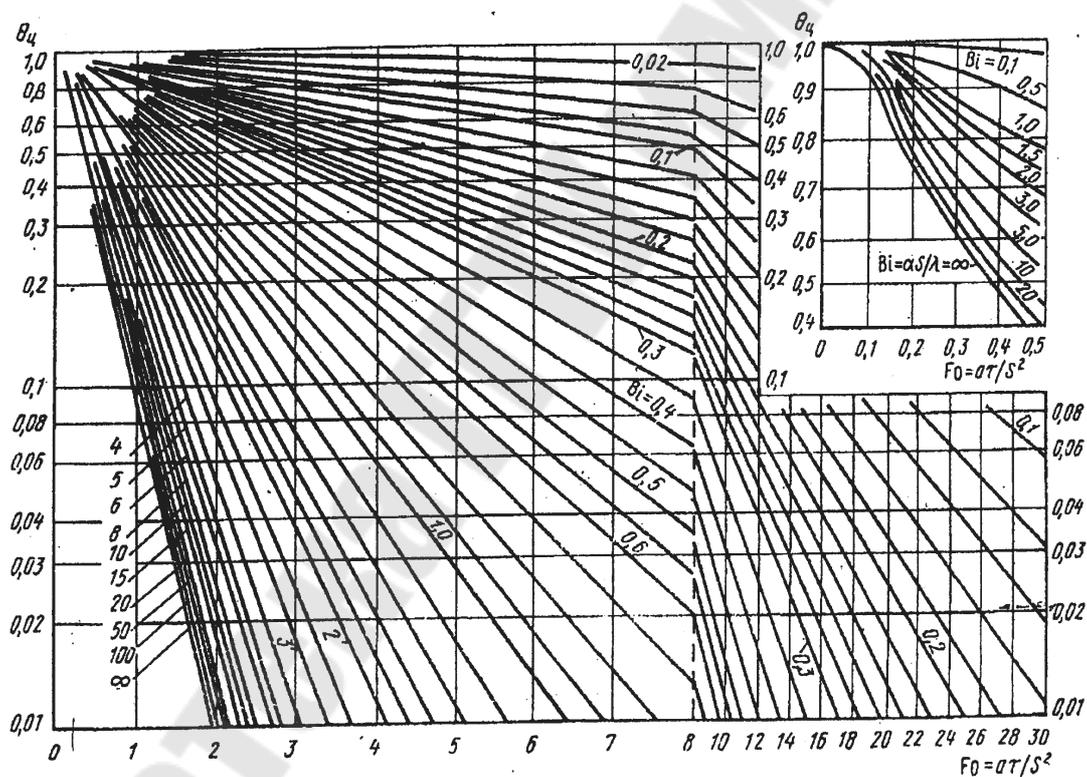


Рис. 3.1. Номограмма для расчета нагрева и охлаждения центра плиты

3.2.2. Расчет времени нагрева методом конечных разностей

Метод конечных разностей основан на том, что в дифференциальном уравнении теплопроводности бесконечно малые величины заменяют малыми, но уже конечными величинами.

Принимаем:

x – периклазошпинелидный слой;

y – шамотный слой;

z – слой КАОН.

Дифференциальное уравнение теплопроводности для одномерного потока имеет вид:

$$dT / d\tau = a(d^2T / dx^2). \quad (3.18)$$

Для определения Δx всю стенку конечной толщины (периклазошпинелидный слой) произвольно разделяем на n равных по величине слоев:

$$\Delta x = 0,178 / n. \quad (3.19)$$

Отрезок времени $\Delta\tau$ определяем в зависимости от величины Δx по выражению

$$\Delta\tau = \Delta x^2 / 2 \cdot a, \quad (3.20)$$

где a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$.

$$a_x = \lambda / c\rho. \quad (3.21)$$

Толщина следующих стенок определяется по выражению

$$\Delta y = \Delta x \sqrt{a_y / a_x}. \quad (3.22)$$

Температура в каждом слое стенки в определенный отрезок времени может быть определена как полусумма температур предыдущего и последующего слоев в предшествующий отрезок времени:

$$T_{\Delta\tau_1; \Delta x_1} = \frac{T_{\Delta\tau_0; \Delta x_0} + T_{\Delta\tau_0; \Delta x_2}}{2}; \quad (3.23)$$

$$T_{\Delta\tau_2; \Delta x_2} = \frac{T_{\Delta\tau_1; \Delta x_1} + T_{\Delta\tau_1; \Delta x_3}}{2}; \quad (3.24)$$

$$T_{\Delta\tau_n; \Delta x_m} = \frac{T_{\Delta\tau_{n-1}; \Delta x_{m-1}} + T_{\Delta\tau_{n-1}; \Delta x_{m+2}}}{2}. \quad (3.25)$$

В месте соприкосновения двух материалов температуру можно найти по выражению

$$T_{\Delta\tau_n;xy} = \frac{R_1 T_{\Delta\tau_n;\Delta y} + R_2 T_{\Delta\tau_n;\Delta x}}{R_1 + R_2}, \quad (3.26)$$

где $R_1 = \Delta x / \lambda_1$ и $R_2 = \Delta y / \lambda_2$ – тепловое сопротивление элементарных слоев первой и второй стенок, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$; $T_{\Delta\tau;\Delta x}$; $T_{\Delta\tau;\Delta y}$ – температура соприкасающихся слоев соответственно первой и второй стенок в тот же отрезок времени $\Delta\tau$.

$$\begin{aligned} R_1 &= \Delta x / \lambda_1, \\ R_2 &= \Delta y / \lambda_2, \\ R_3 &= \Delta z / \lambda_3. \end{aligned} \quad (3.27)$$

4. ПРИМЕРНЫЕ ТЕМЫ ЗАДАНИЙ

Рассчитать тепловой баланс печи, определить термический КПД.

Исходные данные:

1. Тип печи: камерная топливная нагревательная печь, температура в рабочем пространстве 1350°C , топливо – природный газ, расход топлива – $150 \text{ м}^3/\text{ч}$, температура нагрева стальных заготовок 1200°C , марки стали Ст5, размеры заготовки – диаметр 150 мм , длина 600 мм , укладка заготовок – в один слой с промежутками 100 мм , максимальная загрузка печи – 10 заготовок.

2. Рассчитать продолжительность периода разогрева печи от включения до стационарного состояния (по температурному режиму). Температура наружной поверхности стенки печи – не более 100°C . Исходные данные – по заданию 1.

3. Рассчитать необходимую мощность (удельный расход электроэнергии) для обеспечения работы нагревательной электрической печи, выбрать и рассчитать электронагреватели. Исходные данные – по заданию 1.

4. Рассчитать величину тепловых потерь в печах по заданию 1 и 3, рассчитать и сравнить термический КПД печей.

5. Рассчитать необходимую удельную мощность электродуговой печи для плавки стали. Емкость печи, марка стали, технологические параметры – задаются преподавателем.

6. Рассчитать геометрические параметры нагревательных печей – по исходным данным заданий 1 или 3. Сделать эскиз рабочего пространства. Выбрать футеровку (температура наружной поверхности $\leq 100^\circ\text{C}$).

7. Рассчитать геометрические параметры трехфазной ДСП. Емкость печи – по заданию преподавателя.

Варианты заданий выдаются преподавателем путем изменения параметров печей в исходных данных, например, температура нагрева заготовок или воздуха, рабочего пространства, марки стали и т. п. Кроме того, для расчета геометрических параметров печи задаются тип и производительность. При выдаче заданий по расчету рекуператоров указываются тип (радиационный, конвективный, комбинированный и т. п.) и производительность.

Литература

1. Кривандин, В. А. Теория, конструкции и расчеты металлургических печей : в 2 т. / В. А. Кривандин, Ю. П. Филимонов. – Москва : Металлургия, 1986.

2. Долотов, Г. П. Печи и сушила литейного производства / Г. П. Долотов, Е. А. Кондаков. – Москва : Машиностроение, 1984. – 232 с.

3. Егоров, А. В. Электроплавильные печи черной металлургии : учеб. для вузов / А. В. Егоров. – Москва : Металлургия, 1985. – 280 с.

4. Электрические промышленные печи. Дуговые печи и установки специального нагрева / под ред. А. Д. Свенчанского. – Москва : Энергоатомиздат, 1981.

5. Дуговые сталеплавильные печи : атлас / И. Ю. Зинуров [и др.]. – Москва : Металлургия, 1978. – 180 с.

6. Егоров, А. В. Расчет мощности и параметров электроплавильных печей: учеб. пособие для вузов / А. В. Егоров. – Москва : МИСиС, 2000. – С. 41–52.

Содержание

Предисловие	3
1. Общие положения	3
2. Расчет теплового баланса	4
2.1. Тепловой баланс пламенной печи непрерывного действия	5
2.2. Расходная часть	6
2.3. Пример расчета теплового баланса печи	8
2.4. Расход энергии в электродуговой сталеплавильной печи ДСП	10
3. Определение геометрических размеров нагревательной печи	14
3.1. Порядок расчета	14
3.2. Расчет времени разогрева футеровки	17
4. Примерные темы заданий	21
Литература	23

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ЛИТЕЙНЫХ ЦЕХОВ

**Методические указания
к контрольным работам по одноименному курсу
для студентов специальности 1-36 02 01
«Машины и технология литейного производства»
дневной и заочной форм обучения**

Электронный аналог печатного издания

Автор-составитель: **Ровин** Леонид Ефимович

Редактор *Н. Г. Мансурова*
Компьютерная верстка *Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 30.07.07.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,48.

Изд. № 3.

E-mail: ic@gstu.gomel.by

<http://www.gstu.gomel.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:
Издательский центр учреждения образования
«Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого».

ЛИ № 02330/0131916 от 30.04.2004 г.

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.