

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Гомельский государственный технический  
университет имени П.О. Сухого

Кафедра «Машины и технология литейного производства»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ  
по дисциплине  
«Металлургическая теплотехника»  
для студентов специальности  
1-36 02 01 Машины и технология литейного производства

Ровин Л.Е.

Гомель, 2010

## Лабораторная работа № 1

### «Определение коэффициента теплоотдачи от охлаждающегося тонкого тела»

**Цель работы:** экспериментальное определение и расчет коэффициента теплоотдачи конвекцией и излучением.

#### Общие сведения

Тепловое излучение – это особый вид переноса тепловой энергии, осуществляемого электромагнитными волнами, который возможен не только в однородной изотропной среде, но и в вакууме. Законы теплового излучения тождественны законам оптики и электромагнетизма. Теория представляет лучистый перенос теплоты как поток, имеющий как волновой, так и квантовый характер распространения. Количество теплоты излучаемой нагретым телом, пропорционально четвертой степени абсолютной температуры этого тела (Дж):

$$Q = C \cdot (T/100)^4 \cdot F \cdot \tau,$$

где  $C$  – коэффициент излучения, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$F$  – поверхность, м<sup>2</sup>;

$\tau$  - время, с.

Теплообмен в рабочем пространстве печей происходит, в основном, за счет излучения и может составлять от 60 до 100 % от общей передачи теплоты.

Поток теплоты, испускаемый телом или средой, называют собственным потоком излучения  $Q_{\text{соб}}$ .

Поток теплоты, попавший на рассматриваемую поверхность, называют падающим  $Q_{\text{пад}}$ . Часть этого потока, отраженную телом, - отраженным  $Q_{\text{отр}}$ , а часть потока, поглощенную телом, - поглощенным потоком  $Q_{\text{погл}}$ .

Сумма потоков собственного и отраженного излучения получила название эффективного потока  $Q_{\text{эф}} = Q_{\text{соб}} + Q_{\text{отр}}$ .

Результат теплообмена излучением между двумя телами характеризуется потоком, оставшимся в теле, называемым результирующим или сальдо потоком и равным разности падающего и эффективного или поглощенного и собственного потоков излучения:

$$Q_s = Q_{\text{рез}} = Q_{\text{пад}} - Q_{\text{эф}} = Q_{\text{погл}} - Q_{\text{соб}}.$$

Тела, полностью поглощающие падающий на их поверхность тепловой поток, называют абсолютно черными, а тела, полностью отражающие этот поток - абсолютно белыми.

Все реальные твердые тела могут частично поглощать и частично отражать поток излучения, падающий на поверхность.

Газовые среды могут сами излучать теплоту (при наличии в их составе трех и более атомных газов), могут частично поглощать и пропускать поток теплоты.

Расчеты теплообмена излучением должны учитывать как диффузность (распространение по всем направлениям), так и направленность (в определенном телесном угле) излучения.

Конвекция – вид передачи теплоты, при непосредственном контакте движущейся жидкости или газа с твердой поверхностью при наличии между ними разности температур. Конвекция непосредственно связана с движением среды относительно поверхности, или наоборот.

Различают два вида конвекции: естественную (свободную) и вынужденную. При передаче теплоты естественной конвекцией движущей силой среды является разность плотностей этой среды, вызванная разностью температур как в самой среде, так и между средой и поверхностью. Передача тепла при вынужденной конвекции осуществляется в условиях, когда среда движется относительно под действием внешних сил, создаваемых побудителями движения.

Независимо от вида конвекции тепловой поток определяется по закону Ньютона:

$$Q = \alpha(T_f - T_s)F \quad (\text{Вт})$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м<sup>2</sup>·°C).

$T_f, T_s$  – температуры среды и поверхности, °C.

$F$  – площадь поверхности, м<sup>2</sup>.

В случае, если передача теплоты идет от поверхности, имеющей более высокую температуру, к среде, имеющей более низкую температуру, в формуле температуры меняют местами.

Для определения количества тепла, передаваемого конвекцией, обычно пользуются уравнением Ньютона-Рихмана:

$$Q = \alpha(T_f - T_s)Ft, \quad (\text{Дж})$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м<sup>2</sup>·°C).

$T_f, T_s$  – температуры поверхности и среды, °C.

$F$  – площадь поверхности, м<sup>2</sup>.

$t$  – время, с.

При охлаждении нагретого тела в условиях стационарного теплового режима, имеет место баланс теплоты.

Количество теплоты, теряемое телом в окружающую среду, с одной стороны, определяется как теряемое телом массой  $m$  и теплоемкостью  $c$  при понижении температуры от  $T_1$  до  $T_2$ , с другой стороны по закону Ньютона-Рихмана, как отдаваемое

поверхностью этого тела в среду за время  $t$  при среднем коэффициенте теплоотдачи  $\alpha_0$  :

$$cm(T_1 - T_2) = \alpha_0 (T_n - T_c)Ft,$$

где  $T_n$  – температура поверхности тела;

$T_c$  – температура окружающей среды;

$F$  – площадь поверхности тела;

$\alpha_0$  – средний коэффициент теплоотдачи;

$c$  – удельная теплоемкость тела;

$m$  – масса тела.

Температура теплоотдающей поверхности  $T_n$  принимается средней за расчетный период  $t$ . Температура среды  $T_c$  принимается постоянной.

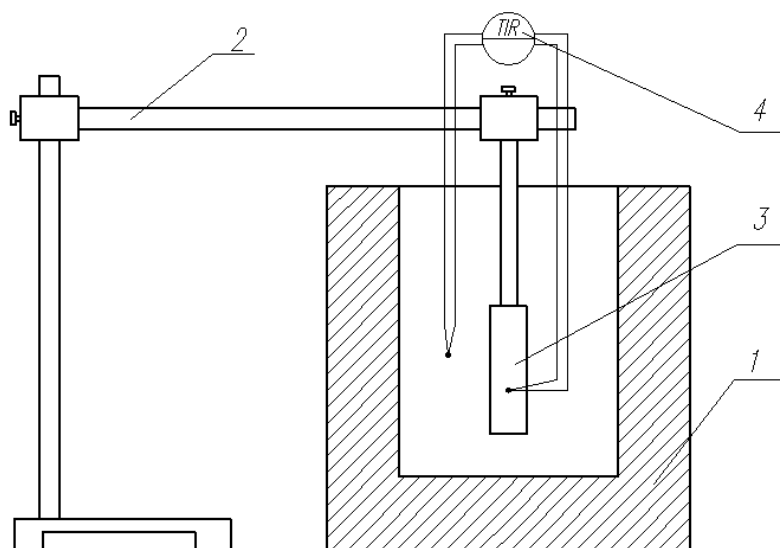
Из уравнения можно определить значение коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha_0 = \frac{cm(T_1 - T_2)}{F(T_n - T_{cp})t}.$$

### Порядок проведения работы.

1. Для проведения лабораторной работы необходима экспериментальная установка, которая состоит из лабораторной шахтной печи 1, штатива 2 и медного цилиндра 3 диаметром 13 мм и высотой 200 мм. Внутренний диаметр цилиндра – 9,7 мм. В середину цилиндра вставлена хромель-алюмелевая термопара, соединенная с прибором для регистрации температуры 4.

Схема установки.



2. Цилиндр разогревают в другой нагревательной печи до температуры 800 – 850 °С, подвешивают на штатив и производят измерения температуры тела через определенные промежутки времени. Так как в эксперименте используется тонкостенное тело, можно предположить, что изменение температуры по толщине стенки невелико и во всех расчетах принимать равными температуру поверхности  $T_n$  и среднюю температуру по сечению стенки тела  $T$ . Полученные данные записывают в виде таблицы.

3. По результатам эксперимента построить графики изменения температуры по времени.

4. Рассчитать общий коэффициент теплоотдачи для определенного промежутка времени по формуле:

$$\alpha_0 = \frac{cm(T_1 - T_2)}{F(T_n - T_{cp})t},$$

принимая  $c = 0,103 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ ,  $\rho = 8,94 \text{ г}/\text{см}^3$ .

Массу тела находим из выражения :  $m = \rho V$ , где объем цилиндра вычисляем по формуле:

$$V = \left( \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4} \right) L$$

Площадь поверхности цилиндра:  $F = \pi DL$

5. Вывод.

### **Содержание отчета.**

1. Цель работы.
2. Краткая теоретическая часть (основные определения и формулы).
3. Схема установки.
4. Таблица результатов опыта и графики.
5. Расчет общего коэффициента теплоотдачи.
6. Вывод.

### **Вопросы.**

1. Что называется тепловым излучением.
2. Формула для определения количества теплоты передаваемого излучением.
3. Что называется абсолютно черным телом и абсолютно белым.
4. Что такое собственный поток излучения.
5. Условия существования теплового излучения.
6. Что называется конвекцией.
7. Виды конвекции.
8. Уравнение Ньютона, для теплового потока.

## Лабораторная работа № 2

### «Исследование теплопередачи через однослойную огнеупорную плоскую стенку»

**Цель работы:** ознакомление с теоретическими основами стационарного теплового режима и экспериментальное определение плотности теплового потока, проходящего через однослойную плоскую стенку.

#### Общие сведения.

В теплопередаче исследуются распределение температуры в системе тел или внутри отдельного тела, а также процесс перехода тепла, связанный с различием температур.

Различают три вида передачи тепла: теплопроводность, конвекцию и тепловое излучение.

**Теплопроводностью** называется процесс переноса энергии, происходящий вследствие движения и энергетического взаимодействия микрочастиц (молекул, атомов, ионов, электронов).

Передача тепла теплопроводностью наиболее характерно осуществляется в гомогенных твердых непрозрачных телах. В газах и жидкостях, как правило, одновременно действует теплопередача конвекцией и излучением. В прозрачных телах наряду с теплопроводностью наблюдается излучение.

Тепловое состояние термодинамической системы (тела) характеризуется **температурным полем**, под которым понимается совокупность значений температур для всех точек тела в данный момент времени. Различают одномерное  $T = f(x)$ , двумерное  $T = f(x, y)$  и трехмерное  $T = f(x, y, z)$  температурное поле.

Процесс, характеризующийся постоянством температуры во времени, называется **стационарным (установившимся) тепловым режимом**.

Для такого поля можно записать:

$$T = f(x, y, z) = \text{const}; \quad \frac{dT}{d\tau} = 0$$

Если по объему тела температурное поле неоднородно, то всегда будут существовать микрообъемы, имеющие одинаковые температуры. Совокупность точек тела с одинаковыми значениями температур образует **изотермические линии или поверхности**. Конфигурация изотермических линий или поверхностей в реальных процессах может быть различной. Поток теплоты вдоль изотермической поверхности отсутствует, так как вдоль нее нет разности температур. Максимальное изменение температуры имеет место в направлении нормали к изотермической поверхности.

Количественной характеристикой того, насколько резко изменяется температура на бесконечно малом участке тела (практически в точке) служит температурный градиент (°С/м):

$$\text{grad } T = \frac{dT}{dx} + \frac{dT}{dy} + \frac{dT}{dz} = \lim \left( \frac{\Delta T}{\Delta n} \right)_{\Delta n \rightarrow 0}$$

**Температурный градиент** – это вектор, нормальный к изотермической поверхности, направленный в сторону возрастания температуры и численно равный производной от температуры.

Если температурное поле одномерно, т.е.  $T$  изменяется только вдоль одной оси, то

$$\text{grad } T = \frac{dT}{dx}$$

Интенсивность процесса переноса теплоты теплопроводностью определяется **законом Фурье**. Количество переданной теплоты пропорционально падению температуры, времени и площади сечения, перпендикулярного направлению распространения теплоты:

$$dQ = -\lambda \text{grad } T \, dF \, d\tau = -\lambda \frac{dT}{dn} \, dF \, d\tau \quad \text{или} \quad Q^* = -\lambda F \tau \text{grad } T \quad (\text{Дж})$$

Количество теплоты, проходящее за единицу времени через изотермическую поверхность площадью  $F$ , называется **тепловым потоком**. (Вт).

$$Q = -\lambda F \text{grad } T$$

Тепловой поток, отнесенный к единице площади изотермической поверхности, называется **плотностью теплового потока**  $q$  (Вт/м<sup>2</sup>):

$$q = -\lambda \text{grad } T$$

Знак «-» показывает, что направления векторов градиента температур и теплового потока противоположны.

**Коэффициент теплопроводности**  $\lambda \left( \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}} \right)$ , характеризует способность

вещества проводить теплоту и определяется как количество теплоты, которое проходит через единицу площади изотермической поверхности при температурном градиенте равном единице. На величину коэффициента теплопроводности оказывают влияние температура, давление, объемная масса материала, пористость и характер распределения пор, влажность, химический состав и структура материала.

Рассмотрим процесс теплопроводности через неограниченную плоскую однослойную стенку толщиной  $s$  и коэффициентом теплопроводности  $\lambda$  (постоянный). Температуры на наружной и внутренней поверхностях ( $T_1$  и  $T_2$ ) известны и постоянны.

Плотность теплового потока по закону Фурье выражается следующим образом:

$$q = -\lambda \operatorname{grad} T = -\lambda \frac{dT}{dx}.$$

Температуру в любой точке рассматриваемой плоской стенки можно определить из выражения:

$$T = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{s} x,$$

где  $x$  – расстояние от поверхности с температурой  $T_1$  до рассматриваемого сечения.

Теплопроводность зависит от температуры и закон распределения температуры по толщине стенки является параболическим. Но обычно зависимость коэффициента теплопроводности от температуры принимают линейной:

$$\lambda = \lambda_0 [1 \pm b(T - T_0)],$$

где  $\lambda_0$  – коэффициент теплопроводности при температуре  $T_0 = 0^\circ\text{C}$ ;

$b$  – температурный коэффициент, определяемый опытным путем.

Чаще закон теплопроводности Фурье для рассматриваемого случая записывают:

$$q = \frac{\lambda}{s} (T_1 - T_2)$$

Отношение  $\frac{\lambda}{s}$  называется **тепловой проводимостью**, а величина

обратная ей – **термическим сопротивлением**. ( $R = \frac{s}{\lambda}$ ).

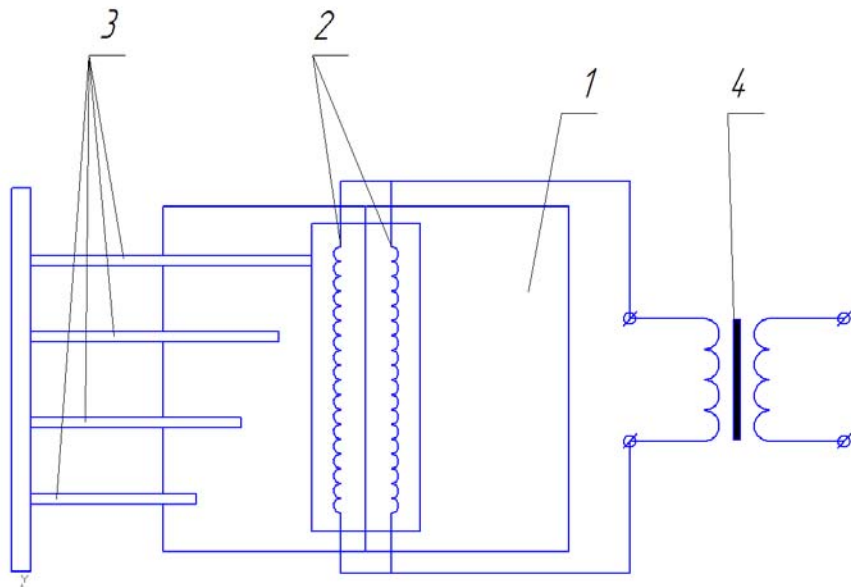
В связи с вышеизложенным в данной работе ставится задача исследовать характер изменения плотности теплового потока в зависимости от изменения толщины однослойной стенки.

### **Порядок проведения работы.**

1. Для проведения лабораторной работы необходимы: экспериментальная установка с нагревателями, градусники.



### Схема установки.



- 1 - Установка из шамотного кирпича с просверленными отверстиями:  $s_1 = 0$ ,  $s_2 = 20$ ,  $s_3 = 30$ ,  $s_4 = 40$  (мм); 2 - нагреваемые спирали; 3 - градусники; 4 - понижающий трансформатор.
2. Снять показания температуры на различном расстоянии от источника нагрева через каждые 2 мин в течении 20 мин. Результаты записать в виде таблицы:

$\tau$ , мин.	$t$ , °C			
	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$
0				
2				
4				
6				
8				
10				
12				
14				
16				
18				
20				

3. По результатам эксперимента построить графики изменения температуры по времени для каждого  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $s_3$ ,  $s_4$ .
4. Рассчитать плотность теплового потока для определенного момента времени ( $\tau = 10$  мин) в каждой из точек  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $s_3$ ,  $s_4$ , принимая  $\lambda_{ш} = 0,835$  (средняя справочная величина) Вт/(м°C) по формуле:

$$q = \frac{\lambda_{ш}}{s} (T_1 - T_2),$$

где  $T_1$  – температура в точке  $s_1$ .

5. Сделать вывод.

### Содержание отчета.

7. Цель работы.

8. Краткая теоретическая часть (основные определения и формулы).

9. Схема установки.

10. Таблица результатов опыта и графики.

11. Расчет плотности теплового потока.

12. Вывод.

### Вопросы к лабораторной работе.

1. Что понимают под явлением теплопроводности?

2. Что такое температурное поле, какие виды температурного поля Вы знаете?

3. Что такое стационарный тепловой режим?

4. Что такое температурный градиент, тепловой поток, плотность теплового потока; в каких единицах они выражаются?

5. Что характеризует температурный градиент?

6. Сформулируйте основной закон теплопроводности.

7. Что такое коэффициент теплопроводности, его физический смысл?

8. Как характеризуется изменение температуры по толщине однослойной однородной стенки?

9. Что такое тепловая проводимость и термическое сопротивление?

10. Что называется изотермической поверхностью?

11. От чего зависит величина коэффициента теплопроводности?

12. Напишите формулу теплового потока через плоскую однослойную стенку.

## Лабораторная работа № 3

### «Исследование теплопроводности через многослойную плоскую стенку»

Цель работы: экспериментальное определение зависимости плотности теплового потока от свойств различных материалов многослойной плоской стенки.

#### Общие сведения

Свойство материалов сохранять механическую прочность при высоких температурах без нагрузки называется огнеупорностью. Огнеупорность – одно из основных свойств, которое определяет возможность использования огнеупоров в определенных температурных условиях и зависит от химического состава и наличия примесей. Огнеупоры разрушаются в большинстве случаев при температурах ниже их огнеупорности. Чаще разрушение наступает в результате реакций огнеупоров со шлаками и пылью или вследствие недостаточной термостойкости и реже из-за малой механической прочности. Поэтому о пригодности материала для того или иного элемента печи не следует судить только по его огнеупорности.

Способность огнеупорных материалов выдерживать без разрушения резкие колебания температур называется термостойкостью.

Рассмотрим процесс теплопроводности через неограниченную плоскую многослойную стенку.

Для многослойной стенки, имеющей толщины слоев  $S_1, S_2, \dots, S_n$  и соответствующие коэффициенты теплопроводности  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  значение плотности теплового потока определяется по формуле:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\sum R},$$

$$\text{где } \sum R = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{S_n}{\lambda_n}.$$

Температуру в любой точке многослойной стенки при стационарных условиях можно определить из выражения:

$$T_x = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{\sum R} R_x,$$

где  $R_x$  – сумма термических сопротивлений той части многослойной стенки, которая находится между плоскостями с температурами  $T_1$  и  $T_x$ .

Характер распределения температур в пределах одного слоя подчиняется прямолинейной зависимости; для многослойной стенки с разными коэффициентами  $\lambda$  распределение температур характеризуется ломаной линией, причем, чем меньше значение  $\lambda$ , тем круче угол наклона прямой.

Наибольшей теплопроводностью обладают металлы ( $\lambda = 20 \dots 400 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$ ). С увеличением температуры для большинства металлов теплопроводность падает. Точные количественные закономерности изменения коэффициента теплопроводности от концентрации компонентов в сплавах не установлены. Однако известно, что добавление к металлу с высокой теплопроводностью небольших количеств металла с меньшей теплопроводностью приводит к резкому снижению теплопроводности сплава. Изменение структуры металла также приводит к изменению теплопроводности.

Коэффициент теплопроводности капельных жидкостей колеблется от 0,08 до 0,7 Вт/(м $^\circ$ С).

В отличие от жидкостей, в газах перемещение молекул ограничивается длиной свободного пробега. Явление чистой теплопроводности в газах наблюдается в очень тонких слоях и состоит во взаимном обмене молекулами и их соударениях между собой. Коэффициент теплопроводности газов невелик ( $\lambda = 0,005 \dots 0,5 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$ ). Исключение составляют гелий и водород. Их теплопроводность в 5 – 10 раз больше из-за малой молекулярной массы. Зависимость коэффициента теплопроводности газов от температуры описывается формулой:

$$\lambda = \lambda_0 \left( \frac{T}{273} \right)^{\frac{3}{2}}$$

Величина коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов находится в пределах 0,02...3,0 Вт/(м $^\circ$ С) и зависит от структуры материала, его пористости и влажности. Эти границы условные, так как характеризуют совместный перенос теплоты теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением в порах и капиллярах. Так, например, если поры и капилляры материала заполнены водой, то коэффициент теплопроводности становится значительно больше теплопроводности материала, так как при капиллярном перемещении жидкости большое количество теплоты передается благодаря высокой теплоемкости воды.

### **Порядок проведения работы**

2. Для проведения лабораторной работы необходима экспериментальная установка, которая состоит из: 1 – нагревательная печь, 2 – многослойная стенка: а) – шамотный кирпич, б) – асбокартон, в) – пластик), с просверленными на определенном уровне отверстиями, 3 – градусники.

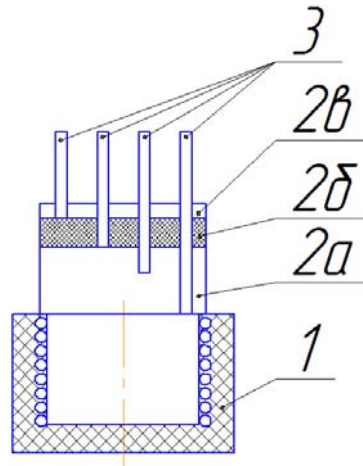


Схема установки.

3. Снять показания температуры на различном расстоянии от источника нагрева через каждые 2 мин в течение 20 мин. Результаты записать в виде таблицы:

τ, мин	t, °C			
	Шамот			Асбест S3
	S <sub>0</sub>	S1	S2	
0				
2				
4				
6				
8				
10				
12				
14				
16				
18				
20				

3. По результатам эксперимента построить графики изменения температуры по времени для каждого слоя.

4. Рассчитать плотность теплового потока для определенного момента времени в каждой из точек S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>, принимая λ<sub>ш</sub> = 0,835 Вт/(м°C), λ<sub>асб</sub> = 0,2 Вт/(м°C) по формуле:

$$q = \frac{T_0 - T_n}{\sum R} = \frac{T_0 - T_n}{\frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{S_n}{\lambda_n}},$$

где T<sub>0</sub> – температура в точке S<sub>0</sub>.

5. Сделать вывод.

## **Содержание отчета**

13. Цель работы.
14. Краткая теоретическая часть (основные определения и формулы).
15. Схема установки.
16. Таблица результатов опыта и графики.
17. Расчет плотности теплового потока.
18. Вывод.

## **Вопросы к лабораторной работе**

1. Понятие огнеупорности.
2. Понятие термостойкости.
3. От чего зависит теплопроводность материалов?
4. Формула плотности теплового потока через плоскую многослойную стенку.
5. Формула для определения температуры в любой точке многослойной стенки при стационарных условиях.

## Лабораторная работа № 4

### «Рекуперативные теплообменники»

**Цель работы:** ознакомиться с типами, конструкцией и принципом действия рекуператоров.

#### Общие сведения

Конвективный теплообмен представляет собой сложный процесс переноса теплоты в жидкостях и газах, обусловленный совместным действием конвекции и теплопроводности. В микрообъемах имеет место процесс переноса тепла теплопроводностью, а на макроуровне – за счет перемешивания. На формирование и интенсивность тепловых потоков между стенкой и жидкостью влияют физические свойства жидкости и режим ее движения, размеры и положение тела, обтекаемого жидкостью. Из теплофизических свойств жидкости наибольшее влияние на теплообмен оказывают: плотность, теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность. Кроме того, для реальной жидкости должна учитываться вязкость жидкости, т.е. свойство жидкости оказывать сопротивление перемещению одной части относительно другой. Вязкость зависит от температуры и давления и характеризуется коэффициентом вязкости.

**Конвекция** – особый вид передачи теплоты при непосредственном контакте движущейся жидкости или газа с твердой поверхностью при наличии между ними разности температур. Таким образом, конвекция непосредственно связана с движением среды относительно поверхности, или наоборот.

В зависимости от природы возникновения различают конвективный теплообмен при вынужденном и свободном движении жидкости. Свободное движение происходит вследствие разности температур, вызывающих разность плотностей жидкости или газа. Если движение поддерживается искусственно, за счет внешних побудителей (насос, вентилятор и т.п.), то имеет место вынужденная конвекция.

По характеру движения различают ламинарное и турбулентное течение жидкости. При малых скоростях частицы движутся по плавным непересекающимся траекториям. При этом отдельные струйки движутся прямолинейно и параллельно друг другу. Вид траектории частиц определяется формой границ тела, обтекаемого потоком. Такое движение носит название слоистого или ламинарного. Вследствие теплового движения происходит диффузионный обмен веществ.

Турбулентное движение характеризуется хаотическим движением частиц. Траектории движения быстро изменяются во времени и в пространстве. Скорость, давление и другие параметры изменяются беспорядочно и нерегулярно.

Для процессов теплоотдачи характер движения жидкости определяет механизм переноса теплоты. Перенос теплоты при ламинарном движении в направлении нормали к поверхности стенки осуществляется

теплопроводностью. При турбулентном характере движения жидкости в тонком слое у поверхности течение жидкости замедляется вследствие наличия вязкого трения. Этот слой принято называть пограничным или слоем Прандтля. Пограничный слой представляет собой область течения вязкой теплопроводной жидкости, которая характеризуется малой толщиной по сравнению с продольными размерами области и большим поперечным градиентом скорости, температуры и концентрации, изменением которых и обуславливаются процессы переноса количества движения, теплоты и вещества. Различают гидродинамический, тепловой и диффузионный пограничные слои. Гидродинамический пограничный слой представляет собой область потока, непосредственно прилегающую к поверхности твердого тела, в которой происходят наиболее существенные изменения скорости. Тепловой и диффузионный пограничные слои характеризуют область потока, в которой наблюдаются наибольшие градиенты температуры или концентрации компонентов смеси. В самом пограничном слое движение может быть как ламинарным, так и турбулентным, но всегда существует ламинарный подслой. Термическое сопротивление этого слоя оказывает существенное влияние на интенсивность теплообмена, так как перенос теплоты через ламинарный слой осуществляется только теплопроводностью.

Согласно уравнению Ньютона полное количество тепла, передаваемого от одной среды к другой в единицу времени пропорционально разности температур этих сред  $\Delta T$  и площади поверхности стенки  $F$  (Вт):

$$Q = K \Delta T F$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности теплопередачи, характеризующий интенсивность процесса теплообмена в рекуператоре, Вт/(м<sup>2</sup>°C);

$\Delta T$  – средняя (по всей поверхности нагрева) разность температур между дымовыми газами и воздухом, °C;

$F$  – поверхность нагрева, через которую происходит передача тепла от дымовых газов к воздуху (газу), м<sup>2</sup>.

Коэффициент  $K$  обратно пропорционален сумме термических сопротивлений стенки и теплоотдачи на ее поверхностях:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи от горячей среды к стенке;

$S$  – толщина стенки;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности стенки;

$\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи от горячей стенки к нагреваемой среде.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  представляет собой количество теплоты, передаваемого в единицу времени единицей поверхности при разности температур между поверхностью и средой в один градус.

Коэффициент теплопередачи рекуператора является основной характеристикой, определяющей эффективность его работы. Он зависит от



скорости движения теплоносителей, разности температур между ними, материала и толщины разделяющей их стенки.

**Рекуператор** представляет собой теплообменный аппарат, работающий в условиях стационарного теплового состояния, когда тепло постоянно передается от остывающих дымовых газов к нагреваемому воздуху (газу) через стенку.

Рекуператоры часто применяют при подогреве дутья в вагранках, что позволяет интенсифицировать процесс горения и сократить расход топлива. При этом сокращаются также выбросы вредных веществ в атмосферу.

В рекуператорах движение газообразной среды может быть **противоточное, перекрестное** и **прямоточное**. Принято схему движения рассматривать по ходу дыма.

При противоточном движении конечная температура воздуха  $T_B^K$  (температура подогрева воздуха) может быть выше конечной температуры дымовых газов  $T_D^K$ , чего никогда не может быть при прямоточной схеме движения.

При противотоке температура стенки рекуператора может быть значительно выше, чем при прямотоке. Поэтому более эффективную противоточную схему используют в керамических и металлических рекуператорах при относительно невысоких температурах отходящих дымовых газов. Прямоточную схему применяют для металлических рекуператоров в том случае, если температура дымовых газов настолько велика, что возникает опасность в отношении стойкости материала рекуператора.

Как при противотоке, так и при прямотоке температура дымовых газов и воздуха изменяется по поверхности нагрева, что обуславливает изменение разности температур дымовых газов и воздуха. Поэтому характерной является средняя разность температур по всей поверхности нагрева  $\Delta T_{cp}$ .

Рекуператоры выполняются из металла и керамических материалов. **Металлические** рекуператоры по характеру теплообмена можно разделить на **конвективные (игольчатые и трубчатые)** и **радиационные**. Нередко выполняют комбинированные (радиационно-конвективные) металлические рекуператоры, в которых одна часть работает в условиях конвективной теплопередачи, а другая – в условиях радиационного режима.

Металл рекуператоров работает в условиях высоких температур при динамическом и окисляющем действии дымовых газов. Для изготовления рекуператоров применяют обыкновенные углеродистые стали, а также легированные стали и чугуны.

Трубчатые рекуператоры могут быть с прямыми трубами и с петлеобразной формой труб.

Игольчатые разделяют на: а) рекуператоры, в которых иглы расположены на внутренней стороне; б) рекуператоры, в которых иглы расположены на внешней стороне.

В радиационных металлических рекуператорах значительная толщина слоя излучающих газов и тепловое излучение дымовых газов является определяющим видом теплопередачи на дымовой стороне рекуператора.

Керамические рекуператоры работают при весьма высоких температурах, материал рекуператоров должен обладать достаточной огнеупорностью, хорошей термостойкостью, высокой температурой начала деформации при нагрузке, высокой теплопроводностью, необходимыми механическими свойствами, низким коэффициентом линейного расширения и быть достаточно стойким против воздействия железистых шлаков.

Чаще всего для изготовления керамических рекуператоров служит шамот.

Преимущества металлических рекуператоров по сравнению с керамическими следующие:

а) более высокий коэффициент теплопередачи и большая удельная поверхность нагрева ( $\text{м}^2/\text{м}^3$ ); это обеспечивает лучшую компактность металлических рекуператоров и, следовательно, меньший объем при одинаковой общей поверхности нагрева;

б) нет необходимости в глубоких подземных боровых, можно размещать рекуператоры над печами;

в) улучшенная герметичность.

Сварные металлические рекуператоры можно применять для подогрева газа.

Недостатком металлических рекуператоров является их малая стойкость против воздействия высоких температур.

Керамические рекуператоры более громоздки, характеризуются меньшим коэффициентом теплопередачи и меньшей удельной поверхностью нагрева. Они мало герметичны и совершенно непригодны для подогрева газа. Размещают керамические рекуператоры только под печами, они занимают много места и требуют значительных подземных боровых. Однако керамические рекуператоры могут устойчиво работать при температуре дымовых газов  $1200 - 1400^\circ\text{C}$ , в них обеспечивается подогрев воздуха до  $800 - 850^\circ\text{C}$ , что позволяет применять их на высокотемпературных печах.

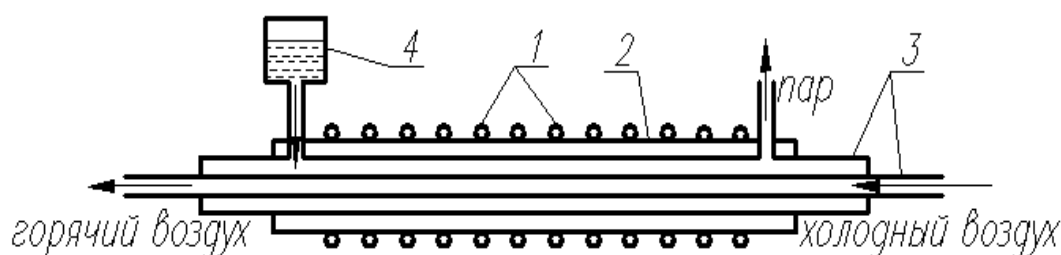
### Порядок проведения лабораторной работы

Для проведения лабораторной работы нужна установка, состоящая из :

1 – нагревательного элемента, 2 – кварцевой трубки,

3 - медных трубок, 4 - резервуара с водой.

На примере работы установки ознакомиться с принципом действия противоточного рекуператора.



### **Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Схема установки.
4. Вывод.

### **Вопросы к лабораторной работе**

1. Что называется конвекцией?
2. Что представляет собой рекуператор?
3. Напишите уравнение Ньютона для передачи тепла конвекцией?
4. Напишите уравнение коэффициента пропорциональности теплопередачи. Что он характеризует?
5. Что представляет собой коэффициент теплоотдачи?
6. От чего зависит коэффициент теплопередачи?
7. Назовите типы рекуператоров.
8. В чем преимущества и недостатки металлических рекуператоров?
9. Назовите преимущества и недостатки керамических рекуператоров.

## Лабораторная работа №5

### «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.

#### Общие сведения

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»<sup>\*</sup> 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 [1]:

$$q = k_{\alpha} P_{\text{д}} \cos \alpha / (4 \pi r^2), \quad (1)$$

где  $q$  - облученность, кВт/м<sup>2</sup>;

$P_{\text{д}}$  - мощность дуги, кВт;

$\alpha$  - угол между направлением излучения и нормалью к облучаемой площадке футеровки стены, рад;

$r$  - расстояние от дуги до облучаемой площадки, м;

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

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

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

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

---

<sup>\*</sup> «Свободное» пространство ДП представляет собой часть рабочего пространства выше уровня откосов ванны, ограниченную внутренней поверхностью футеровки стены и свода.

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

$\square$  - коэффициент мощности;

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

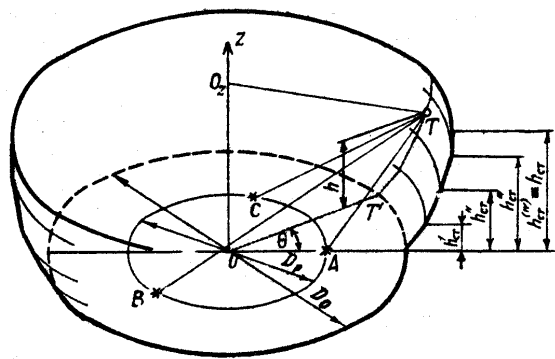
$k_{\text{и}}$  - коэффициент использования мощности;

$N$  - 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 (рис. 1). В этом случае азимутальный угол  $\square = 0$  и  $q_{\square} = q_{\text{max}}$ . Геометрические характеристики излучения  $r_i$  и  $\square_i$  в формуле (2) выражают при заданном расположении электродов ( $k = D_p / D_o = \text{const}$ ) через определяющий размер рабочего пространства дуговой печи — диаметр на уровне откосов ванны  $D_o$  и относительную высоту положения рассматриваемой площадки футеровки стены  $h_r = h / D_o$ .

Соотношение (2) позволяет получить эпюру облученности футеровки стены дуговой печи различного профиля (рис. 2) по высоте, т. е.

$$q_{\square} = f(h_r). \quad (3)$$



$$\begin{aligned} AT &= r_A, \\ BT &= r_B, \\ CT &= r_C, \\ \angle ATO_z &= \square_A \\ \angle BTO_z &= \square_B \\ \angle CTO_z &= \square_C \\ h_{\text{ст}}^I &= k_{\text{ст}}^I \cdot D_o \\ h_{\text{ст}}^{II} &= k_{\text{ст}}^{II} \cdot D_o \\ h_{\text{ст}}^{III} &= k_{\text{ст}}^{III} \cdot D_o \\ h_{\text{ст}}^{(IV)} &= k_{\text{ст}}^{(IV)} \cdot D \end{aligned}$$

Рис. 1. Схема “свободного” пространства трехэлектродной дуговой печи.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Математическая модель теплообмена в дуговой печи реализована на языке Паскаль в виде программы "IZ2" (блок-схема алгоритма расчета представлена на рис. 3) объемом 148576 Bytes.

Запуск программы из каталога в виде: C:\IZ2\IZ2.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:

Наименование величины (параметра), обозначение на экране	Обозначение в тексте Пособия
1	2
Вместимость МО, Мг	$m_o$
Номинальная мощность трансформатора SN, МВ·А	$S_{ном}$
Число дуг-источников излучения N	$N$
Коэффициент мощности КМ	$\lambda$
Коэффициент использования мощности Ким	$k_{и}$
Электрический коэффициент полезного действия	$\eta_э$
Кпдэ	
Диаметр рабочего пространства на уровне откосов	$Do$
Do, м	
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.

KST 1S	относительная высота первого яруса	$k_{ст}^I$
KST 2S	аналогично для второго яруса	$k_{ст}^{II}$
KST 3S	аналогично для третьего яруса	$k_{ст}^{III}$
KST 4S	аналогично для четвертого яруса	$k_{ст}^{IV}$
1		2

Alf 1S	угол наклона образующей внутренней поверхности первого яруса футеровки стены к вертикали (см. рис. 2з), градус	$\square^I$
Alf 2S	аналогично для второго яруса (см. рис. 2з), градус	$\square^{II}$
Alf 3S	аналогично для третьего яруса (см. рис. 2з), градус	$\square^{III}$
Alf 4S	аналогично для четвертого яруса (см. рис. 2з), градус	$\square^{IV}$
DKST	шаг изменения относительной высоты F, азимутальный угол, градус	$\Delta h_r$ $\theta$

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  $\Delta k_{\text{ст}}$  (т.е. DKST) по числу вариантов индивидуального задания участникам выполняемой лабораторной работы:

Обозначение		Наименование величины (параметра)	Единица измерения
на экране и в протоколе	в тексте Пособия		
<b>KST</b>	$h_r$	Относительная высота рассматриваемой элементарной площадки футеровки стены	
$A$	$r_A$	Радиус - вектор АТ (см. рис. 1)	м
$B$	$r_B$	Радиус - вектор ВТ (см. рис. 1)	м
$C$	$r_C$	Радиус - вектор СТ (см. рис. 1)	м
$XI$	$\square_A$	Угол АТО (см. рис. 1)	градус
$X2$	$\square_B$	Угол ВТО (см. рис. 1)	градус
$X3$	$\square_C$	Угол СТО (см. рис. 1)	градус
$Q$	$q_{\square}$	Облученность рассматриваемой элементарной площадки на цилиндрической поверхности футеровки стены	кВт/м <sup>2</sup>

## ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И УКАЗАНИЯ ПО ОХРАНЕ ТРУДА

1. Изучить с помощью демонстрационного плаката алгоритм расчета (см. рис. 3), 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  $m_o$  [2];

— номинальная мощность трансформатора  $S_{ном}$  [2];

— параметры энергетического и электрического режимов рассматриваемого периода плавки (коэффициент использования мощности  $k_n$ , коэффициент мощности  $\cos \varphi$ , электрический КПД  $\eta_e$ );

— вариант расположения электродов (соотношение  $k = D_p/D_o$ ).

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 [3], 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 машинного счета)

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
KED	0,35	0,25
K1	0,85	0,95
K2	1,00	1,00
K3	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 « $h_r - q_{\square}$ » для наиболее теплонагруженной зоны, т.е. против электрода (когда азимутальный угол  $\square = 0, 2\square/3$  или  $4\square/3$ );

— выполняет необходимые геометрические построения (в масштабе) для заданной точки футеровки на относительной высоте и определяет геометрические характеристики излучения, например, для дуги А (см. рис. 1) в виде  $r_A$  и  $\square_A$  (с помощью транспортира),

— заполняет соответствующую строку табл. 1.

**Таблица 1**

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 <sup>2</sup> , при $h/D_o$									Прогноз стойкос ти футеров ки
	0	0,0 5	0,1	0,1 5	0,2	0,2 5	0,3	0,3 5	0,4	
Цилиндрическ ая										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 [1, 3].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Егоров А.В. Электроплавильные печи черной металлургии. Учебник для вузов - М.: Металлургия, 1985, с.с. 50-55, 60-62, 68, 77-79, 85-88.
2. Егоров А.В. Расчет мощности и параметров электроплавильных печей. Учебное пособие для вузов. М.: \*МИСиС\*, 2000, с.с. 45, 49.
3. Дуговые сталеплавильные печи: Атлас /Зинуров И.Ю., Строганов А.И., Кузнецов Л.К. и др. - М.: Металлургия, 1978, с.с. 53, 54-64 (факультативно).

## 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 (по материалам атласа [3]) ?
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 [1] печи заданной вместимости и мощности в различные периоды плавки.

## Лабораторная работа №6

### «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.

#### Общие сведения

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 [1]:

$$q = k_3 P_d \cos \beta / (4\pi r^2), \quad (1)$$

где  $q$  - облученность, кВт/м<sup>2</sup>;

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

$\beta$  - 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:

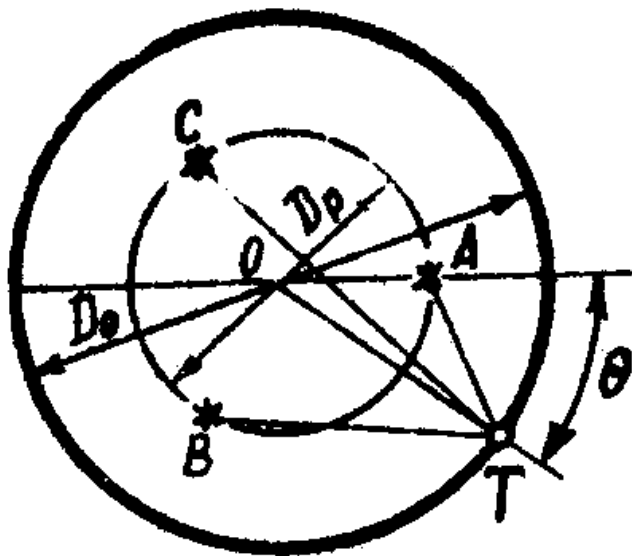
$$q_\Sigma = \sum_{i=1}^{i=N} q_i = (P_d/4\pi) \sum_{i=1}^{i=N} (k_3 \cos \beta / r^2)_i, \quad (2)$$

где  $P_d = S_{\text{ном}} \cdot \lambda \cdot \eta_3 \cdot k_n / N$ ;

$S_{\text{ном}}$  - номинальное значение полной мощности дуговой печи, кВт·А;  
 $\lambda$  - 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  $\beta_i$  получают из соответствующих треугольников (рис. 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  $\theta$  с учетом относительного диаметра распада электродов  $k = D_p / D_0$ .



$$AT = r_A, \angle ATO = \beta_A$$

$$BT = r_B, \angle BTO = \beta_B$$

$$CT = r_C, \angle CTO = \beta_C$$

Рис. 1. Схема рабочего пространства трехэлектродной дуговой печи

Соотношение (2) позволяет получить эпюру облученности по периферии футеровки стены на уровне дуг в зависимости от расположения электродов, т. е.

$$q_{\Sigma} = f(\theta, k). \quad (3)$$

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Математическая модель теплообмена в дуговой печи реализована на языке Паскаль в виде программы "IZ1" (блок-схема алгоритма расчета представлена на рис. 2) объемом 134864 Bytes.

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:

Обозначение		Наименование величины (параметра)	Единица измерения
на экране	в тексте Пособия		
1	2	3	4
<b>SN</b>	$S_{\text{ном}}$	Номинальное значение полной мощности дуговой печи	МВ·А
<i>DO</i>	$D_o$	Диаметр рабочего пространства печи на уровне откосов ванны	м
<i>KM</i>	$\lambda$	Коэффициент мощности	
1	2	3	4
<i>KIM</i>	$k_{\text{и}}$	Коэффициент использования номинального значения полной мощности	
<i>KPDE</i>	$\eta_3$	Электрический КПД	
<i>KEDH</i>		Нижний предел изменения отношения $D_p/D_o$	
<i>KEDB</i>		Верхний предел изменения отношения $D_p/D_o$	
<i>K1</i>	$k_{31}$	Коэффициент, характеризующий равномерность распределения мощности по фазам и излучения дуги фазы А в пространстве печи (см. рис. 1)	
<i>K2</i>	$k_{32}$	То же для дуги фазы В	
<i>K3</i>	$k_{33}$	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):

Обозначение		Наименование величины (параметра)	Единица измерения
на экране и в протоколе	в тексте Пособия		
<b>KED</b>	$k$	Относительный диаметр распада электродов	
$F$	$\theta$	Азимутальный угол (см. рис. 1)	градус
$A$	$r_A$	Радиус - вектор АТ (см. рис. 1)	м
$B$	$r_B$	Радиус - вектор ВТ (см. рис. 1)	м
$C$	$r_C$	Радиус - вектор СТ (см. рис. 1)	м
$X1$	$\beta_A$	Угол АТО (см. рис. 1)	градус
$X2$	$\beta_B$	Угол ВТО (см. рис. 1)	градус
$X3$	$\beta_C$	Угол СТО (см. рис. 1)	градус
$Q$	$q_\Sigma$	Облученность рассматриваемой элементарной площадки на цилиндрической поверхности футеровки стены на уровне дуг	кВт/м <sup>2</sup>

## ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И УКАЗАНИЯ ПО ОХРАНЕ ТРУДА.

1. Изучить с помощью демонстрационного плаката алгоритм расчета (см. рис. 2), 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 (см. рис. 2).

Для проведения данной работы студенты получают групповое и индивидуальные задания.

Групповое задание включает следующую информацию:

- вместимость ДСП  $m_o$  [2];
- номинальная мощность трансформатора  $S_{\text{ном}}$  [2];
- параметры энергетического и электрического режимов рассматриваемого периода плавки (коэффициент использования мощности  $k_{\text{и}}$ , коэффициент мощности  $\lambda$ , электрический КПД  $\eta_{\text{э}}$ ).

Индивидуальное задание включает следующую информацию:

- азимутальный угол  $\theta$  (в интервале от 0 до 360° с дискретностью 10°);
- соотношение  $k = D_p/D_o$  (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 и атласа [3], 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:

	Вариант 1	Вариант 2
<b>SN, MB·A</b>	15	15
<i>DO</i> , м	3,54	3,54
<i>KM</i>	0,8	0,8
<i>KIM</i>	0,5	0,5
<i>KPDE</i>	0,95	0,95
<i>KEDH</i>	0,3	0,3
<i>KEDB</i>	0,5	0,5
<i>K1</i>	0,9	1,0
<i>K2</i>	1,0	1,0
<i>K3</i>	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  $q_\Sigma = f(\theta)$  аналогично рис. 3а;
- оценивает степень неравномерности тепловой нагрузки футеровки в виде отношения  $q_{\max}/q_{\min} > 1$  и заполняет соответствующую строку в табл. 1.

Таблица 1

Результаты анализа степени равномерности тепловой нагрузки футеровки дуговой печи

емкостью  $m_0 = \dots$  Мг с номинальной мощностью трансформатора  $S_{\text{ном}} = \dots$  МВ·А

Исходные данные: диаметр  $D_0 = \dots$  м  
мощность дуги  $P_d = \dots$  кВт

Отношение $k = D_p/D_0$	Экстремальное значение облученности $q$ , кВт/м <sup>2</sup>	Азимутальный угол $\theta$ , 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 рис.1 и определяет соответствующие геометрические характеристики излучения  $r_i$  и  $\beta_i$  (с помощью транспортира) для заданной точки футеровки (азимутальный угол  $\theta$ ) на уровне дуг.

В рамках группового задания студенты:

- строят на демонстрационном стенде несколько круговых эпюр облученности при различном расположении электродов ( $k = D_p/D_0 = \text{varia}$ );
- строят на демонстрационном стенде зависимости (аналогично рис. 3б):

$$\begin{aligned} q_{\max} &= f_1(k); \\ q_{\min} &= f_2(k); \\ q_{\max} / q_{\min} &= f_3(k); \end{aligned}$$

- 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  $k_{\text{рац}} = D_p/D_0$  с литературными данными [3].

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Егоров А.В.* Электроплавильные печи черной металлургии. Учебник для вузов - М.: Металлургия, 1985. с.с. 50-55, 58-61, 68, 77-79.
2. *Егоров А.В.* Расчет мощности и параметров электроплавильных печей. Учебное пособие для вузов. М.: \*МИСиС\*, 2000, с.с. 254, 261-262.
3. Дуговые сталеплавильные печи: Атлас /Зинуров И.Ю., Строганов А.И., Кузнецов Л.К. и др. - М.: Металлургия, 1978, с.с. 10-11, 34-45 (факультативно).

## 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  $k_3$ . В каких случаях работы дуговой печи  $k_3 < 1$  или  $k_3 > 1$ ? 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 (по материалам атласа [3])?
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 [1].