|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| **Челябинский металлургический комбинат**  29.03.2021 № 125/3-3 |  |

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ**

**Описание последовательности вычислений системы Разгар горна**

|  |
| --- |
| СОГЛАСОВАНО: |
|  |
| Директор департамента АСУТП |
|  |
| \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ К.С.Теличко |
|  |
| «\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2021 г. |
|  |
|  |

Челябинск 2021

**ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ**

к Математическому обеспечению описания последовательности вычислений системы Разгар горна№ 125/3-3 от 29.03.2021 г.

СОГЛАСОВАНО:

УВСИТЦУ:

Гл. специалист бюро ДПиУЭ А.В.Суковицин

РАЗРАБОТАЛ:

Математик Н.А.Иванов

Оглавление

[1 Введение 5](#_Toc67925176)

[2 Расчет горновой части 6](#_Toc67925177)

[2.1 Tдатч.тек. - текущая температура с датчиков 6](#_Toc67925178)

[2.2 Проверка входных данных 6](#_Toc67925179)

[2.3 Tдатч.нач. - начальная температура с датчиков 6](#_Toc67925180)

[2.4 Tкерам - температура в точке перехода к слою керамического стакана 6](#_Toc67925181)

[2.5 Снач - расчет начального коэффициента распределения теплового потока 7](#_Toc67925182)

[2.6 Tнач.2 - начальная температура во второй опорной точке 7](#_Toc67925183)

[2.7 Численное решение полинома 7](#_Toc67925184)

[2.8 Tтек.2 - текущая температура во второй опорной точке 8](#_Toc67925185)

[2.9 Стек - расчет текущего коэффициента распределения теплового потока 8](#_Toc67925186)

[2.10 (r,t)i – расчет распределения температур по горизонтали 8](#_Toc67925187)

[3 Расчет лещади 10](#_Toc67925188)

[3.1 Расчет вертикалей №1 и №2 10](#_Toc67925189)

[3.1.1 С - расчет коэффициента распределения теплового потока 10](#_Toc67925190)

[3.1.2 (h,t)i – расчет распределения температур 10](#_Toc67925191)

[3.2 Расчет прямоугольной области 11](#_Toc67925192)

[3.2.1 расчет правой границы сетки (вертикали №3) 11](#_Toc67925193)

[3.2.1.1. С1 - расчет коэффициента распределения теплового потока на поясе №1 11](#_Toc67925194)

[3.2.1.2. T3.1 - температура в нижней боковой точке 11](#_Toc67925195)

[3.2.1.3. Т\_10390,j – расчет распределения температур вертикали №3 12](#_Toc67925196)

[3.2.1 Т\_101,j – расчет левой границы сетки (вертикали №2) 12](#_Toc67925197)

[3.2.2 Т\_10j,276 – расчет верхней границы сетки (пояс №6) 12](#_Toc67925198)

[3.2.3 Т\_10i,j – определение теплового распределения методом прогонки 13](#_Toc67925199)

[4 dX-Расчет величины разгара/гарнисажа/остаточной толщины 15](#_Toc67925200)

[4.1 Расчет экстраполяции данных 15](#_Toc67925201)

[4.2 Расчет теплопроводности слоев футеровки 15](#_Toc67925202)

[4.2.1 Керамический слой 15](#_Toc67925203)

[4.2.2 Микропористый слой 16](#_Toc67925204)

[4.2.3 Муллитовый слой 16](#_Toc67925205)

[4.2.4 Полуграфитовый слой 17](#_Toc67925206)

**Аннотация**

В математическом обеспечении приводятся алгоритмы расчета разгара горна доменной печи №4 и всех, связанных с этим, величин.

1. Введение

Система "Разгар горна" предназначена для оперативного отслеживания состояния разгара кладки доменной печи №4 в горизонтальных и вертикальных проекциях, состояния датчиков температуры, построения графиков архивных данных.

Доступ к системе находится на сайте http://10.2.10.23/razgar.

1. Расчет горновой части
   1. Tдатч.тек. - текущая температура с датчиков

Входными данными в систему являются показания температурных датчиков t (в градусах Цельсия), установленных в кладке доменной печи, информация о которых хранится в базе данных ДП4 (с указанием номера пояса, радиуса и сечения). При выборе прошедшей даты, из базы считываются данные усредненные за сутки. При выборе текущей даты и установке ползунка обновления в режим «Включить обновление» данные из базы считываются ежеминутно. Иначе считываются текущие значения, при запросе на расчет, с указанием времени последнего считывания.

В расчете используются 32 луча, но датчики есть не на всех. Температура на лучах без датчиков рассчитывается как среднее от суммы соседних на выбранном поясе и радиусе.

* 1. Проверка входных данных

Входные данные подвергаются проверке по нескольким условиям, в случае несоответствия происходит запись об ошибке в базу данных (параллельно происходит проверка соответствия базе ошибок, если ошибки не было или была ранее, то записывается новая, с сегодняшней датой) и производится замена. Ошибки с текущей датой считаются активными.

Условия возникновения ошибки:

* ;
* ;
* .

Алгоритм замены:

1. Определяем к какой группе относится датчик (с леткой или без);
2. В группе датчика ищем валидный датчик ;
3. Считываем начальные данные для обоих датчиков ;
4. Рассчитываем значение датчика для замены ошибочного ;
5. Производим замену.
   1. Tдатч.нач. - начальная температура с датчиков

Данный набор температур рассчитан эмпирически и соответствует состоянию печи в момент начала прогара кладки (теоретически соответствует Tдатч.тек. через месяц после начала работы печи).

* 1. Tкерам - температура в точке перехода к слою керамического стакана

Исходные данные для расчета:

* – температура с датчиков начальная, градусов С (пункт 2.3);
* – расстояние от центра печи до датчика, мм (const);
* – расстояние от центра печи до точки перехода из слоя керамического стакана в микропористый слой, мм (const);
* – расстояние от центра печи до футеровки печи в начальный момент времени, мм (const);
* – теплопроводность керамического слоя (пункт 4.2);
* – теплопроводность микропористого слоя (пункт 4.2).

Для нахождения необходимо численно решить следующее уравнение:

* 1. Снач - расчет начального коэффициента распределения теплового потока

Исходные данные для расчета:

* – температура с датчиков начальная, градусов С (пункт 2.3);
* – расстояние от центра печи до датчика, мм (const);
* – расстояние от центра печи до точки перехода из слоя керамического стакана в микропористый слой, мм (const);
* – теплопроводность микропористого слоя (пункт 4.2);
* – температура в точке перехода к слою керамического стакана, С (пункт 2.4).
  1. Tнач.2 - начальная температура во второй опорной точке

Вторая опорная точка находится на расстоянии 100мм от по направлении к центру печи.

Исходные данные для расчета:

* – температура с датчиков начальная, градусов С (пункт 2.3);
* – расстояние от центра печи до датчика, мм (const);
* – начальный коэффициент распределения теплового потока (пункт 2.5);
* – теплопроводность микропористого слоя (пункт 4.2).

Для нахождения необходимо численно решить следующее уравнение (пункт 2.7):

* 1. Численное решение полинома

Решение происходит в несколько этапов:

1. Составляем уравнение полинома вида , путем нахождения первообразной от уравнения функции ,с дальнейшим выражением подобных членов;
2. Задаем минимум и максимум корней (определяется шкалой датчиков температуры);
3. Определяем границы для каждого из корней (с шагом 0.1 рассчитываем значения полинома методом схемы Горнера в точках, если произведение значений полинома в этих точках то значения переменной ограничивают корень);
4. Рассчитываем значение второй производной функции в левой границе каждого корня методом синтетического деления;
5. Для каждой левой границы проверяем условие , если оно истинно, то используем метод Ньютона для левой границы, иначе для правой границы – чтобы итерационно приблизиться к значению корня полинома;
6. Выбираем максимальный корень.
   1. Tтек.2 - текущая температура во второй опорной точке

Исходные данные для расчета:

* – начальная температура с датчиков, градусов С (пункт 2.3);
* – начальная температура во второй опорной точке, градусов С (пункт 2.6);
* – текущая температура с датчиков, градусов С (пункт 2.1).
  1. Стек - расчет текущего коэффициента распределения теплового потока

Исходные данные для расчета:

* Tдатч.тек.– температура с датчиков текущая, градусов С (пункт 2.1);
* – расстояние от центра печи до датчика, мм (const);
* – теплопроводность керамического слоя (пункт 4.2);
* – теплопроводность микропористого слоя (пункт 4.2);
* Tтек.2– текущая температура во второй опорной точке, С (пункт2.8).

В случае 3 и 31 лучей 8,9 поясов расчет проводится по следующей формуле:

.

Иначе:

.

* 1. (r,t)i – расчет распределения температур по горизонтали

Исходные данные для расчета:

* – температура с датчиков текущая, градусов С (пункт 2.1);
* – расстояние от центра печи до футеровки печи в текущий момент времени, мм (пункт 2.11);

Для нахождения распределения температур по горизонтали выполняется цикл с предусловием – пока выполнять:

If r(i) <= r1150\_old Then

r(i + 1) = (0.99999) \* r(i)

Else

If r(i) >= r\_keram\_80 Then

If r1150 < r\_keram\_80 Then

r(i + 1) = r(i) - (rдатч + 1.7 \* r\_keram\_80 - 2.7 \* r1150) / 1150

Else

r(i + 1) = r(i) - (rдатч - r1150) / 1150

End If

Else

r(i + 1) = r(i) - (rдатч + 1.7 \* r\_keram\_80 - 2.7 \* r1150) / 3105

End If

End If

При достижении температур 300, 500, 800, 1150 градусов Цельсия производится запись значений.

* 1. Разгар r1150 дополнение

Исходные данные для расчета:

* Tдатч.тек.– температура с датчиков текущая, градусов С (пункт 2.1);
* – расстояние от центра печи до датчика, мм (const);
* – расстояние от центра печи до футеровки печи в начальный момент времени, мм (const);
* – начальная температура с датчиков, градусов С (пункт 2.3).

1. Расчет лещади

Расчет лещади логически разбит на две части: расчет вертикалей №1,2, расчет боковой прямоугольной области.

* 1. Расчет вертикалей №1 и №2

Вертикали условно делятся на 3 группы в зависимости от радиуса – расстояния от центра печи до датчиков в лещади (№1 – центр печи, радиус 0мм; №2 – радиус 1668мм; №3 – радиус 5568мм). По вертикали датчики лещади расположены на 1, 3, 4, 5, 6 поясах. Расчет вертикалей №1 и №2 производится аналогично.

* + 1. С - расчет коэффициента распределения теплового потока

Исходные данные для расчета:

* Tдатч 1– температура с датчиков 1 пояса, градусов С (пункт 2.1);
* Tдатч 2– температура с датчиков 3 пояса, градусов С (пункт 2.1);
* – высота от основания печи до датчика 1 пояса, мм (const);
* – высота от основания печи до датчика 3 пояса, мм (const);
* – теплопроводность полуграфитового слоя (4.2).

Коэффициента распределения теплового потока:

* + 1. (h,t)i – расчет распределения температур

Исходные данные для расчета:

* – температура с датчиков текущая, градусов С (пункт 2.1);
* – высота от основания печи до датчика 1 пояса, мм (const);
* – теплопроводность полуграфитового слоя (пункт 4.22.4);
* – теплопроводность микропористого слоя (пункт 4.2);
* – теплопроводность микропористого слоя (пункт 4.2);
* - расчет коэффициента распределения теплового потока (пункт 3.1.1).

Для нахождения распределения температур по горизонтали выполняется цикл с предусловием – пока выполнять:

Если , то:

Иначе, если , то:

Иначе:

При достижении температур 300, 500, 800, 1150 градусов Цельсия производится запись значений.

* 1. Расчет прямоугольной области

Боковая прямоугольная область ограничена вертикалями №2 и №3 по вертикали, а также поясами №1 и №6 по горизонтали. Для ее расчета методом сеточной прогонки необходимо рассчитать распределение температуры по прямоугольной сетке координат с шагом в 10мм.

* + 1. расчет правой границы сетки (вертикали №3)

Для расчета распределения температур вертикали №3 необходимо найти значение температуры в нижней боковой точке (3 радиус, 1 пояс). Для этого необходимо рассчитать коэффициент распределения теплового потока на поясе №1, а затем выразить температуру в искомой точке.

* + - 1. С1 - расчет коэффициента распределения теплового потока на поясе №1

Исходные данные для расчета:

* Tдатч 1.1– температура с датчиков 1 радиуса 1 пояса, градусов С (пункт 2.1);
* Tдатч 2.1– температура с датчиков 2 радиуса 1 пояса, градусов С (пункт 2.1);
* – расстояние от центра печи до датчика 1 радиуса 1 пояса, мм (const);
* – расстояние от центра печи до датчика 2 радиуса 1 пояса, мм (const);
* – теплопроводность полуграфитового слоя (пункт 4.2).

Коэффициента распределения теплового потока:

* + - 1. T3.1 - температура в нижней боковой точке

Исходные данные для расчета:

* Tдатч 1.1– температура с датчиков 1 радиуса 1 пояса, градусов С (пункт 2.1);
* Tдатч 2.1– температура с датчиков 2 радиуса 1 пояса, градусов С (пункт 2.1);
* – расстояние от центра печи до датчика 1 радиуса 1 пояса, мм (const);
* – расстояние от центра печи до датчика 2 радиуса 1 пояса, мм (const);
* – теплопроводность полуграфитового слоя (пункт 4.2).

Для нахождения необходимо численно решить следующее уравнение (пункт 2.7):

* + - 1. Т\_10390,j – расчет распределения температур вертикали №3

Расчет температур производится усреднением, с шагом в 10мм, между опорными точками (значениями температур с датчиков вертикали №3).

Исходные данные для расчета:

* T 3.1– температура в точке 3 радиуса 1 пояса, градусов С (пункт 3.2.1.2);
* Tдатч 3.3– температура с датчиков 3 радиуса 3 пояса, градусов С (пункт 2.1);
* Tдатч 3.3– температура с датчиков 3 радиуса 4 пояса, градусов С (пункт 2.1);
* Tдатч 3.4– температура с датчиков 3 радиуса 5 пояса, градусов С (пункт 2.1);
* Tдатч 3.5– температура с датчиков 3 радиуса 6 пояса, градусов С (пункт 2.1);
* – начальная вертикальная координата сетки координат.

Расчет производится в цикле, для j от 1 до 275:

Если j<166:

Иначе, если j<221:

Иначе, если j<276:

* + 1. Т\_101,j – расчет левой границы сетки (вертикали №2)

Исходные данные для расчета:

* – рассчитанная температура 2 радиуса, градусов С (пункт 3.1.2);
* – высота относительно основания печи, мм (пункт 3.1.2);
* – высота линии разгара, относительно основания печи, мм (пункт 3.1.2);
* –вертикальная координата сетки координат (пункт 3.2.1.3).

Если :

Если :

* + 1. Т\_10j,276 – расчет верхней границы сетки (пояс №6)

Исходные данные для расчета:

* – рассчитанная температура 6 пояса, градусов С (пункт 2.10);
* – расстояние относительно центра печи, мм (пункт 2.10);
* – расстояние до линии разгара, относительно цетра печи, мм (пункт 2.10);
* – начальная горизонтальная координата сетки координат.

Расчет производится в цикле, для j от 1 до 390:

Расчет если :

Если :

* + 1. Т\_10i,j – определение теплового распределения методом прогонки

Исходные данные для расчета:

* – распределения температур правой границы, градусов С (пункт 3.2.1.3);
* – начальный прогоночный коэффициент;
* – начальный прогоночный коэффициент;
* – начальный прогоночный коэффициент;
* – прогоночный коэффициент, рассчитывается в цикле горизонтальной прогонки (пункт 3.2.3);
* –координаты двумерной сетки.

Для осуществления прогонки, необходимо в прямом цикле рассчитать прогоночные коэффициенты . Затем в обратном цикле рассчитываются . Прогонка производится горизонтально и вертикально.

Горизонтальная прогонка.

Для i от 2 до 389:

Для i от 389 до 1:

Вертикальная прогонка.

Для j от 2 до 275:

Для i от 389 до 2, j от 275 до 1:

Рассчитанные температуры записываются в базу.

1. dX-Расчет величины разгара/гарнисажа/остаточной толщины

Исходные данные для расчета:

* – начальное расстояние от основания печи до внутренней границы футеровки, мм (const);
* – расстояние от основания печи до линии разгара, мм (пункт 3.1.2,3.2.3);
* – начальное расстояние от центра печи до внутренней границы футеровки, мм (const);
* – расстояние от центра печи до датчика, мм (const);
* – расстояние от центра печи до линии разгара, мм (пункт 2.10).

Расчет для горизонтали, если , то ее – это величина разгара, иначе гарнисажа:

Остаточная толщина определяется по формуле: .

Расчет для вертикали, если , то ее – это величина гарнисажа, иначе разгара:

Остаточная толщина определяется .

* 1. Расчет экстраполяции данных

Экстраполяция данных производится следующим образом:

1. Определяется среднее значение скорости изменения величины температуры или толщины за промежуток от 01.03.2020 до сегодня;
2. Производится расчет с сохранением рассчитанной скорости на выбранный интервал вперед.
   1. Расчет теплопроводности слоев футеровки

Уравнения для теплопроводности материалов получены с помощью аппроксимации табличных данных заявленных в «Техническом проекте ДП4 №GS18.233R». Также учитывалась способность футеровки к «регенерации» c помощью гарнисажа, следовательно, изменение ее коэффициента теплопроводности.

* + 1. Керамический слой

|  |  |
| --- | --- |
| Температура(OX) | Теплопроводность(OY) |
| 20 | 7,5 |
| 400 | 6,5 |
| 800 | 5,7 |
| 1000 | 5,3 |
| 1100 | 5 |

* + 1. Микропористый слой

|  |  |
| --- | --- |
| Температура(OX) | Теплопроводность(OY) |
| 20 | 6,55 |
| 300 | 11,59 |
| 600 | 13,38 |
| 800 | 13,55 |

* + 1. Муллитовый слой

|  |  |
| --- | --- |
| Температура(OX) | Теплопроводность(OY) |
| 20 | 1,74 |
| 400 | 1,83 |
| 1000 | 1,95 |
| 1200 | 2,02 |

* + 1. Полуграфитовый слой

|  |  |
| --- | --- |
| Температура(OX) | Теплопроводность(OY) |
| 20 | 6,67 |
| 300 | 10,07 |
| 600 | 12,24 |
| 800 | 12,53 |